

# BRANDSCHUTZ- FORSCHUNG

DER BUNDESLÄNDER

BERICHTE



Umweltfreundliche Löschverfahren für  
Flüssigkeitsbrände - Hohlglaskugeln

# 201

Ständige Konferenz der Innenminister und -senatoren der Länder,  
Arbeitskreis V, Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten,  
Katastrophenschutz und zivile Verteidigung



Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder  
Arbeitskreis V  
Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung

Forschungsbericht Nr. 201

**Umweltfreundliche Löschverfahren für Flüssigkeitsbrände –  
Hohlglaskugeln**

von

Dipl.-Ing. Monika Kutz  
Dipl.-Phys. Karola Keutel  
Dr. rer. nat. Sandra Wegner  
M.Sc. Daniel Butscher  
Dipl.-Ing. Klaus-Jürgen Kohl (Projektleiter)

Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge  
Abteilung Forschung - Institut der Feuerwehr Sachsen-Anhalt

Heyrothsberge  
September 2019



## BERICHTS-KENNBLETT

Nummer des Berichtes:  <p style="text-align: center;">201</p>	Titel des Berichtes  <p style="text-align: center;">Umweltfreundliche Löschverfahren für Flüssigkeitsbrände - Hohlglasskugeln</p>	ISSN:  <p style="text-align: center;">0170-0060</p>	
Autoren: Dipl.-Ing. Monika Kutz, Dipl.-Phys. Karola Keutel, Dr. rer. nat. Sandra Wegner Msc. Daniel Butscher Dipl.-Ing. Klaus-Jürgen Kohl	durchführende Institution: Institut für Brand- und Katastrophenschutz Heyrothsberge Biederitzer Straße 5 D-39175 Heyrothsberge Direktor: Ltd. BrD Frank Mehr		
Nummer des Auftrages: <p style="text-align: center;">97 (2/2018)</p>	auftraggebende Institution: Ständige Konferenz der Innenminister und –senatoren der Länder, Arbeitskreis V – Ausschuss für Feuerwehrangelegenheiten, Katastrophenschutz und zivile Verteidigung		
Datum des Berichtes: <p style="text-align: center;">August 2019</p>			
Seitenzahl: <p style="text-align: center;">50</p>	Bilder: <p style="text-align: center;">51</p>	Tabellen: <p style="text-align: center;">8</p>	Literaturverweise: <p style="text-align: center;">9</p>
Kurzfassung: <p>Im Forschungsvorhaben wurden Möglichkeiten der Flüssigkeitsbrandbekämpfung mittels verschiedener Feststofflöschmittel in Form von Glasgranulaten bzw. -kugeln untersucht, die auf Siliziumdioxid und gegebenenfalls zusätzlichen Bindemitteln basieren. Diese Löschmittel sollen als Diffusionssperren für die Brennstoffdämpfe dienen und somit die Löschung herbeiführen. Es wurden Versuche im Labor- und Technikumsmaßstab durchgeführt. In den Laborversuchen wurde festgestellt, dass mit kleiner werdendem Durchmesser der Partikel die Verdunstungsrate steigt. In den Brandtests war die Löschung nur mit einem Löschmittel erfolgreich. Nach der Bedeckung der brennbaren Flüssigkeiten mit den getesteten Löschmitteln werden diese mit Flüssigkeit durchsetzt und haften an den Löschmitteln.</p> <p>In den Technikumsversuchen wurde ein Löschmittel untersucht. Die zur Löschung notwendige Schichthöhe der Glaspartikel konnte mit der Löschmittelauswurfsvorrichtung nicht erreicht werden. Die Ausbringung des Löschmittels ist mit einer starken Staubentwicklung verbunden und führt zum Beginn des Löschvorgangs sogar zur kurzzeitigen Intensivierung der Flamme. Das Tragen der entsprechenden PSA ist unbedingt erforderlich. Um die Eignung der Löschmittel besser einschätzen zu können, sind weitere Untersuchungen erforderlich. Der Einsatz mit mobiler Technik ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt für Flüssigkeitsbrände nicht zu empfehlen. Die umweltgerechte Entsorgung der Glaspartikel ist zu gewährleisten.</p>			
Schlagwörter: Flüssigkeitsbrände, Glaspartikellöschmittel, mobile Brandbekämpfung, Diffusionssperre			



# INHALTSVERZEICHNIS

VERZEICHNIS DER BILDER

VERZEICHNIS DER TABELLEN

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLIK

<b>1</b>	<b>EINLEITUNG</b>	1
<b>2</b>	<b>VERSUCHE IM LABORMAßSTAB</b>	3
2.1	Experimente mit PyroBubbles®	3
2.1.1	Ausbringversuche	3
2.1.2	Verdunstungsversuche	6
2.2	Versuche mit Blähglasgranulat und Mikro-Glashohlkugeln	14
2.2.1	Versuche mit NEBU®FIGHT Granulat	14
2.2.2	Versuche mit NEBU®FIGHT Granulat und Binder	15
2.2.3	Versuche mit Mikro-Glashohlkugeln	17
2.2.4	Vergleich	18
2.3	Zusammenfassung der Laborversuche	19
<b>3</b>	<b>VERSUCHE IM TECHNIKUMSMAßSTAB</b>	20
3.1	Ausbringversuche zur Testung von Löschmittelreichweite, -verteilung und Auswurfzeit	21
3.2	Poolbrandversuche im Brandraum 1 des Brandhauses	25
3.3	Zusammenfassung der Versuche im Technikumsmaßstab	47
<b>4</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	48
<b>5</b>	<b>SCHLUSSFOLGERUNGEN</b>	49
	<b>LITERATUR</b>	50
	<b>ANHANG</b>	

## VERZEICHNIS DER BILDER

- 1.1 Feststofflöschmittel in Granulatform (Glashohlkugeln, NEBU®FIGHT Granulat, PyroBubbles® v. l. n. r.)
- 1.2 Feststofflöschmittel als Glasschaum (Foamglas®PFS)
- 2.1 Momentaufnahmen des Einfüllvorgangs der PyroBubbles (Gemisch) auf Heptan
- 2.2 Momentaufnahmen des Einfüllvorgangs der PyroBubbles für die Siebfraction 2 - 3,15 mm auf Heptan
- 2.3 Gegenüberstellung der Verdunstungsintensitäten für die freie Oberfläche, die 5 cm Schicht und die 10 cm Schicht der Pyrobubbles (Mix)
- 2.4 Gegenüberstellung der Verdunstungsraten und -intensitäten bei 5 und 10 cm Schichtdicke der PyroBubbles (1 mm)
- 2.5 Gegenüberstellung der Verdunstungsraten und -intensitäten bei 5 und 10 cm Schichtdicke der PyroBubbles (2 mm)
- 2.6 Gegenüberstellung der Verdunstungsraten und -intensitäten bei 5 und 10 cm Schichtdicke der PyroBubbles (>3,15 mm )
- 2.7 Verdunstungsintensität von Ethanol im Glaszylinder durch eine 5 cm dicke PyroBubbleschicht mit verschiedener Körnung
- 2.8 Versuchsplatz zur Messwerterfassung im Abzug bei geöffneter Abzugshaube ohne Absaugung (links: Versuchsvorbereitung, rechts: Temperatur- und Massenverlustmessung ohne Abdeckung)
- 2.9 Verdunstungsintensität von Heptan im Glaszylinder von 14 cm Durchmesser für freie Verdunstung und bei Bedeckung mit 5 cm und 10 cm dicker PyroBubbleschicht (Mix)
- 2.10 NEBUFIGHT der Körnung 1-2 mm nach Siebanalyse
- 2.11 Verdunstungsversuch mit NEBUFIGHT Granulat (links: Vorbereitung, rechts: Messwerterfassung)
- 2.12 Verdunstungsversuch mit NEBUFIGHT Granulat und NEBU®FIGHT Binder (links: Mischungsbestandteile, rechts: Messwerterfassung) mit Abzug
- 2.13 Verdunstungsversuch mit NEBUFIGHT Granulat und NEBUFIGHT Binder bei ruhendem Abzug (links: Mischungsbestandteile, rechts: Messwerterfassung)
- 2.14 Verdunstungsintensitäten von Ethanol unter Abdeckung mit NEBUFIGHT bei ruhender Umgebung
- 2.15 Verdunstungsversuch mit Mikro-Glashohlkugeln (links: Messwerterfassung, rechts: Oberfläche des Glasschaums)
- 2.16 Probengefäße mit Ethanol und Abdeckung mit Mikro-Glashohlkugeln, NEBUFIGHT Granulat und PyroBubbles (v.l.n.r.)
- 2.17 Fotos der Zündtests bei Mikro-Glashohlkugeln, PyroBubbles und NEBUFIGHT Granulat (v.l.n.r.)
- 3.1 Einsatzbereiter PyroBubblelöscher für einen Ausblasversuch
- 3.2 Momentaufnahmen erster Ausbringversuche mit dem PyroBubblelöscher
- 3.3 Versuchsanordnung mit fester Einspannung und Verlängerung des Düsenrohres
- 3.4 Ausblasversuch mit fester Einspannung eines langen Düsenrohres (vor Brandversuch 001)

- 3.5 Ausblasversuch mit mobilem kurzem Düsenrohr (vor Brandversuch 001)
- 3.6 Momentaufnahmen des Ausbringversuchs mit PyroBubbles nach 10 s (links) und nach 40 s (rechts)
- 3.7 Foto der Versuchsanordnung für Versuch 001
- 3.8 Skizze der Versuchsanordnung mit den Messstellen für Versuch 001 (Blick von der Brandraumtür frontal auf die Brandwannen)
- 3.9 Momentaufnahmen des Brandversuchs 001 zu verschiedenen Zeiten
- 3.10 Foto des Versuchsaufbaus (links) und des Poolbrandes (Versuch 003) 2 min nach der Zündung (rechts)
- 3.11 Skizze der Messstellenanordnung für Versuche 002 und 003 (aus Blickrichtung der Brandraumtür)
- 3.12 Skizze zur Strahlausrichtung im Versuch 004 (Ansicht von der Seite)
- 3.13 Videoschnappschuss des Flammenbrandes mit Beginn der Löschmittelfreigabe (Druckstoß) im Versuch 004
- 3.14 Temperaturen über der Brandwanne im Versuch 004
- 3.15 Wärmestrahlung im Versuch 004
- 3.16 Temperaturen über der Brandwanne im Versuch 005
- 3.17 Wärmestrahlung an den Sensoren Rad2 und Rad3 im Versuch 005
- 3.18 Chronologie des Brand- und Löschversuchs 005
- 3.19 Skizze der Versuchs- und Messstellenanordnung für Versuche 006 bis 009
- 3.20 Temperaturen (T01, T03, T04) über der Brandwanne im Versuch 006
- 3.21 Wärmestrahlungsstromdichte in 1,5 m Entfernung (Rad2) im Versuch 006
- 3.22 Chronologie des Brand- und Löschversuchs 008
- 3.23 Wärmestrahlungsstromdichte in 1,5 m Entfernung (Rad2) im Versuch 008
- 3.24 Temperaturen (T01, T03, T04) über der Brandwanne im Versuch 008
- 3.25 Chronologie des Brand- und Löschversuchs 009
- 3.26 Temperaturen (T01, T03, T04) über der Brandwanne im Versuch 009
- 3.27 Wärmestrahlungsstromdichte in 1,5 m Entfernung (Rad2) im Versuch 009

## **VERZEICHNIS DER TABELLEN**

- 2.1 Versuche mit Bioethanol im Glaszylinder bei Betrieb des Abzuges
- 2.2 Versuche mit Heptan im Glaszylinder bei ruhendem Abzug
- 2.3 Mittlere Werte der Verdunstungsintensität von Ethanol bei Abdeckung durch verschiedene Löschmittel bei einer Schichtdicke von 5 cm
- 3.1 Brand- und Löschversuche mit Versuchsanordnung 1 (1 fester Löscher und manuelle Aufschüttung)
- 3.2 Brand- und Löschversuche mit Versuchsanordnung 2 (2 Löscher)

## VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN UND SYMBOLIK

### Abkürzung Bedeutung

AGBF	Arbeitsgemeinschaft der Berufsfeuerwehren
AÜG	Ausbildungs- und Übungsgelände
IBK	Institut für Brand- und Katastrophenschutz

Symbol	Bedeutung	Dimension
$m$	Masse	$kg$
$V$	Volumen	$m^3$
$\rho$	Dichte	$kg/m^3$
$I_V$	Verdunstungsintensität	$kg/\text{min } m^2$

## 1 Einleitung

Das Mittel der Wahl zur Bekämpfung großer Flüssigkeitsbrände durch die Feuerwehren ist das Schaumlöschverfahren. Trotz des Einsatzes moderner Schaumlöschmittel stellen diese auch bei Verzicht auf fluorverbindungshaltige Komponenten eine Umweltbelastung dar. Inzwischen werden Löschmittel angeboten, die eine Brandbekämpfung ohne oder mit verringerter Umweltbelastung ermöglichen sollen. Dies sind insbesondere Feststofflöschmittel auf der Basis von Glas, die in Form von Granulaten oder Schäumen einsetzbar sind.

Für die Feuerwehr interessante Einsatzgebiete liegen im Bereich der Metallbrände, insbesondere auch von Li-Ionen-Batterien sowie, wie oben schon angeführt, bei Flüssigkeitsbränden. Handelsübliche Granulate sind z. B. PyroBubbles® und NEBU®FIGHT. Als Glasschaum wird Foamglas®PFS angeboten. All diese Löschmittel basieren auf Siliziumdioxid und gegebenenfalls zusätzlichen Bindemitteln.



**Bild 1.1:** Feststofflöschmittel in Granulatform (Glashohlkugeln, NEBU®FIGHT Granulat, PyroBubbles® v. l. n. r.)

PyroBubbles<sup>1</sup> sind ein Produkt der OMEGA MINERALS Germany GmbH und wurden zusammen mit der Genius Entwicklungsgesellschaft mbH entwickelt. Sie werden zur Abdeckung von Brandobjekten benutzt und bilden bei optimaler Anwendung eine wirkungsvolle Isolationsschicht. Bei Magnesiumbränden bilden sie eine Glasschmelze. PyroBubbles werden bereits im anlagentechnischen und bautechnischen Brandschutz z.B. durch Verfüllung von Kabelkanälen genutzt (siehe [GEN 2011; GEN 2019]).

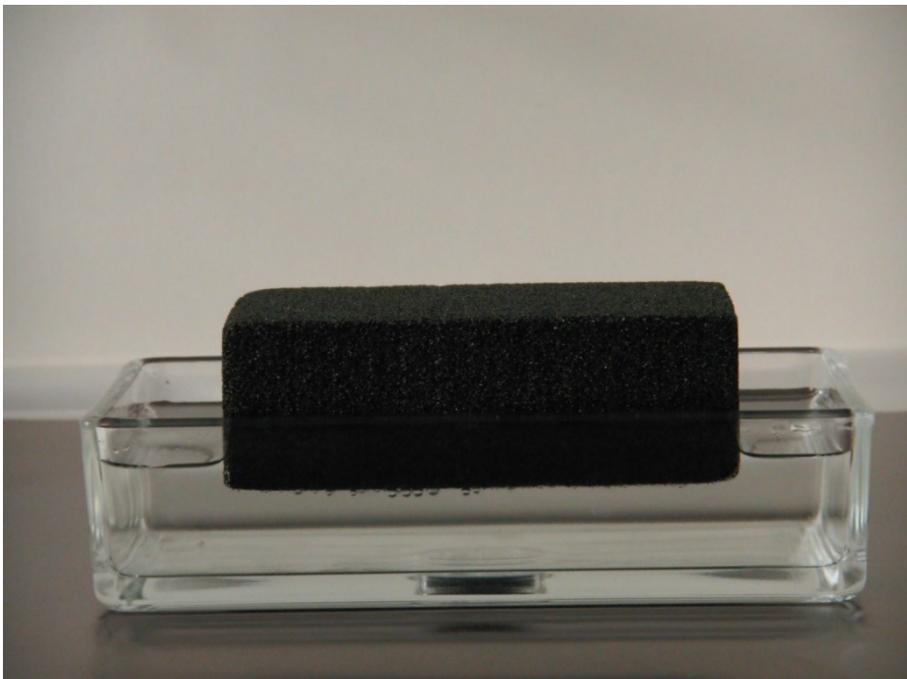
NEBUFIGHT<sup>1</sup> ist ein modifiziertes Blähglasgranulat der Firma NEBUMA GmbH, die ein Patent auf die stoffliche Zusammensetzung und Anwendung als brandklassenübergreifendes Löschmittel besitzt [NEB 2019]. Die Löschwirkung der Blähglasgranulate beruht auf einem

---

<sup>1</sup> Die Produkte PyroBubbles und NEBUFIGHT werden nachfolgend ohne Markensymbol verwendet.

komplexen Mechanismus aus Energieumwandlung durch Schmelzen der Glasbestandteile, der Verhinderung des Sauerstofftransfers nach Herausbildung einer Glasschmelzschicht und der Isolierung des Brandherdes von der Umgebung durch die Glasschmelzschicht. Durch die Verwendung dieses Materials, nämlich an der Oberfläche zielgerichtet veredelter Blähgläser, erkennt das Löschmittel drei Temperaturbereiche. Die bor-veredelte Fraktion schmilzt ab 400-450 °C, so dass bereits bei sehr niedrigen Brandtemperaturen der wichtige Glasfilm ausgebildet wird. Die im SiO<sub>2</sub>-Anteil optimierte Fraktion schmilzt bei 700-800 °C und wird als Sicherheitspuffer bei Hochtemperaturbränden eingesetzt. Die Hochtemperaturfraktion (Schmelzpunkt >1300 °C) wird in der Regel nie bzw. extrem selten schmelzen müssen und dient hauptsächlich der thermischen Isolation [PAT 2019].

Neben den Produkten PyroBubbles und NEBUFIGHT, die im Partikelgrößenbereich von Millimetern liegen, gibt es auch andere auf Siliziumdioxid basierende Glasgranulate, die u. a. schwimmfähig sind und isolierend. Dazu zählen z. B. Mikro-Glashohlkugeln [DB GHK 2019]. Sie werden ebenfalls als Füllstoff, Dämmmaterial verwendet und finden z. B. als Zusatz zu Farben und Putzen oder Additiven in Spritzgießanwendungen Anwendung.



**Bild 1.2:** Feststofflöschmittel als Glasschaum (Foamglas®PFS)

Foamglas<sup>2</sup> ist ein Feststoffschaum, der in Form von Platten als Dämmstoff u. a. auch im Brandschutz eingesetzt wird. Foamglas wird durch Aufschäumen von Glasschmelzen hergestellt. Foamglas PFS wurde auf LNG und LPG-Bränden zur Verringerung des Abbrandes eingesetzt und stellt damit eine weitere interessante Einsatzmöglichkeit dar [Ressource Protection International 2014, Suarden et al. 2011].

---

<sup>2</sup> Weiter wird Foamglas® ohne Markensymbol verwendet.

## 2 Versuche im Labormaßstab

Inwieweit Hohlglasgranulate zur Löschung von Flüssigkeitsbränden im mobilen Einsatz geeignet sind, soll im Weiteren untersucht werden.

Im Fokus der Laboruntersuchungen steht die Anwendung von PyroBubbles zur Flüssigkeitsbrandbekämpfung. Ergänzend dazu wurden die Eignung und Verwendung alternativer Feststofflöschmittel aus Glas- bzw. Glasschaum oder Blähglasgranulat im Labormaßstab getestet.

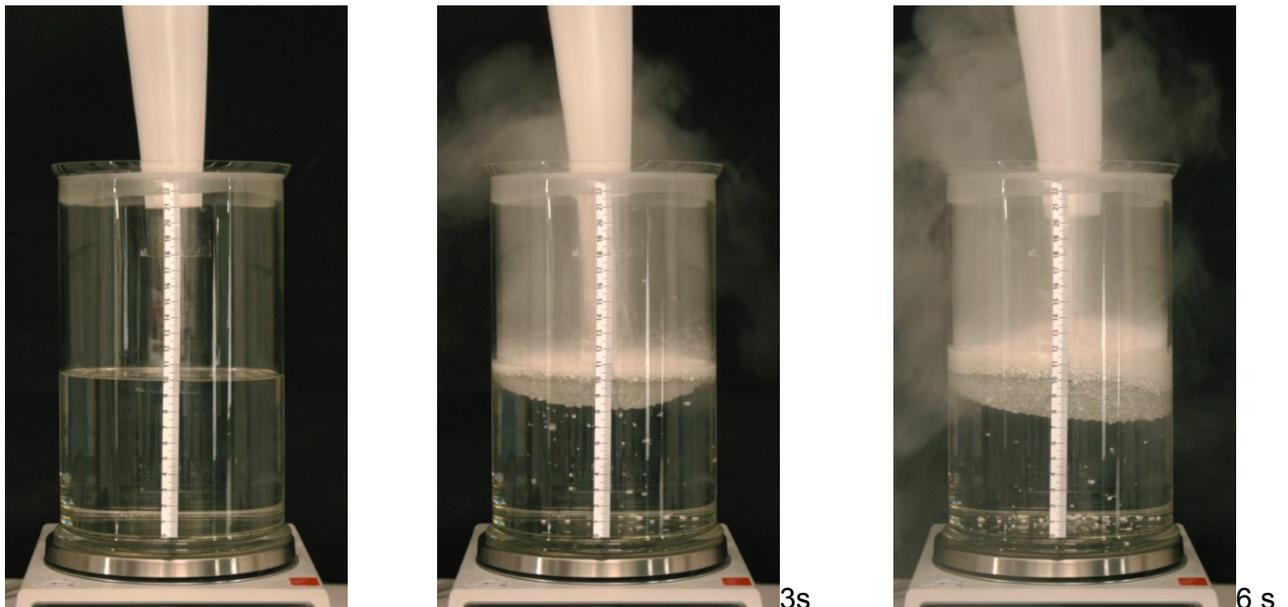
### 2.1 Experimente mit PyroBubbles

Zur Untersuchung der isolierenden Wirkung der PyroBubbles wurden Verdunstungsintensitäten von Flüssigbrennstoffen in Abhängigkeit von Schichtdicke und Korngröße ermittelt. Als Flüssigbrennstoffe wurden stellvertretend für unpolare Brennstoffe Heptan und für die polaren Brennstoffe Ethanol/Bioethanol verwendet.

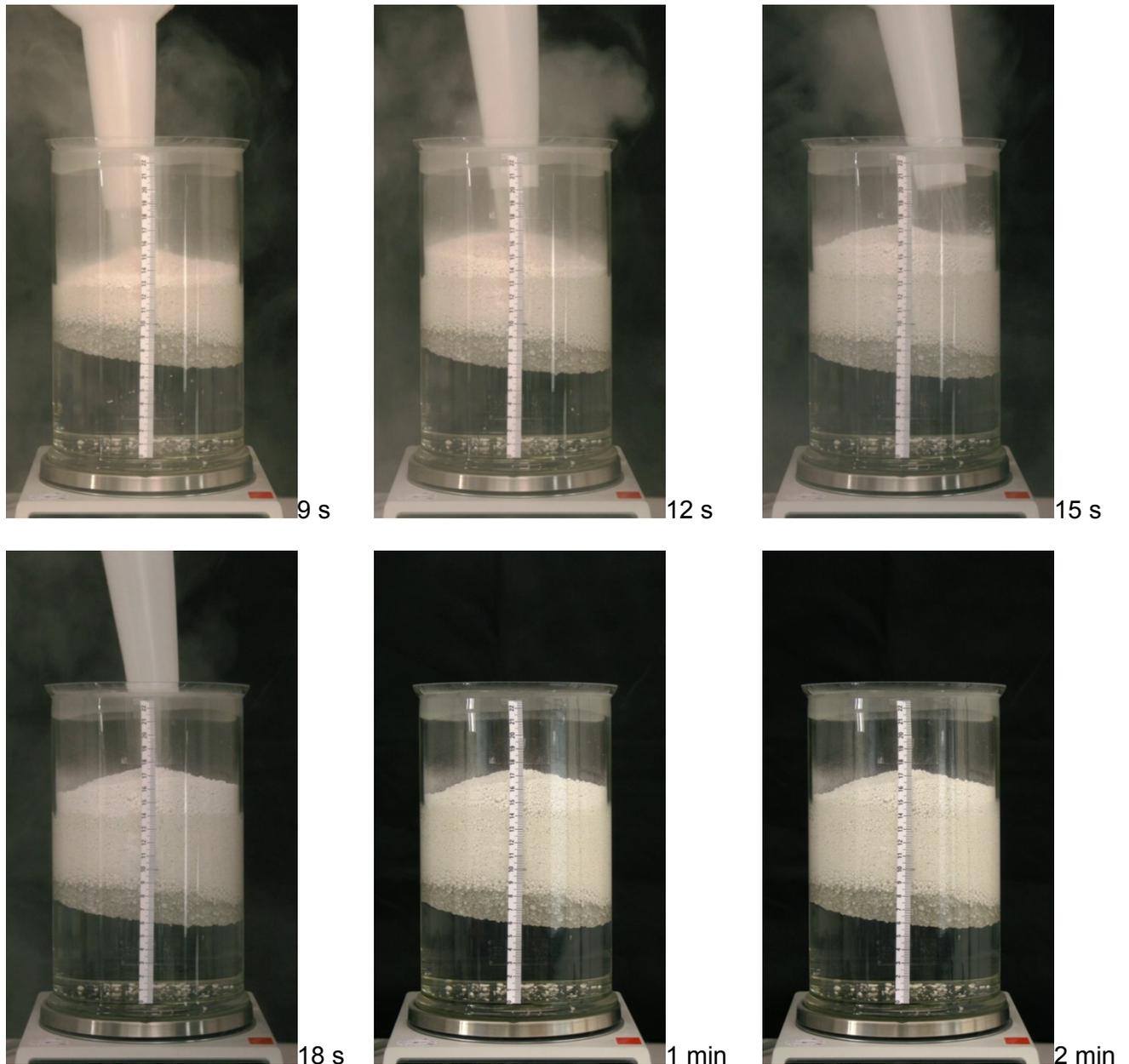
Für diese Verdunstungsversuche wurde die brennbare Flüssigkeit bis zu einer vorgegebenen Füllstandshöhe in ein Gefäß (Glaszylinder bzw. Becherglas) gefüllt, darauf eine Schicht PyroBubbles aufgeschüttet und der Massenverlust durch Wägung erfasst.

#### 2.1.1 Ausbringversuche

Die durchgeführten Versuche dienten dazu, die Verteilung des Schüttgutes in und auf der Flüssigkeit sowie die Durchfeuchtung zu beobachten und in Videoaufnahmen zu dokumentieren. Im Bild 2.1 sind Momentaufnahmen der Aufschüttung von PyroBubbles in einem Glaszylinder mit Heptan und der Füllstandshöhe von 10 cm zu sehen. Es erwies sich als nicht einfach, eine möglichst gleichmäßig dicke Schicht zu erzeugen. Wird versucht, das Granulat nur mittig aufzubringen, bleibt in der Regel ein Schüttkegel stehen, bei manueller Verteilung auf der Fläche führen kleine Ungleichmäßigkeiten schnell zu „Ausbeulungen“ bei der Schichtausbildung, so dass die Bestimmung einer Schichtdicke des Granulats schwierig bzw. ungenau ist.



**Bild: 2.1:** Momentaufnahmen des Einfüllvorgangs der PyroBubbles (Gemisch) auf Heptan (Teil 1)



**Bild: 2.1:** Momentaufnahmen des Einfüllvorgangs der PyroBubbles (Gemisch) auf Heptan (Teil 2)

Aufgefüllt wurde die für eine Schichtdicke von 10 cm erforderliche Menge an PyroBubbles. Der Füllvorgang dauerte 18 Sekunden. Direkt nach Auffüllen des Granulats zeigt sich an der Wand des Glaszylinders ein Flüssigkeitsfüllstand von 14 cm. Inwieweit das nur Randeffekte sind, ist nicht beurteilbar. Die Flüssigkeit ist bis zu einer Füllstandshöhe von ca. 6 cm vorhanden. Da die Dicke der PyroBubbleschicht ca. 10 cm beträgt, ist die Flüssigkeit 4 cm in die PyroBubbles eingedrungen.

Auffallend bei der Befüllung des Zylinders mit den PyroBubbles ist die starke Staubentwicklung.

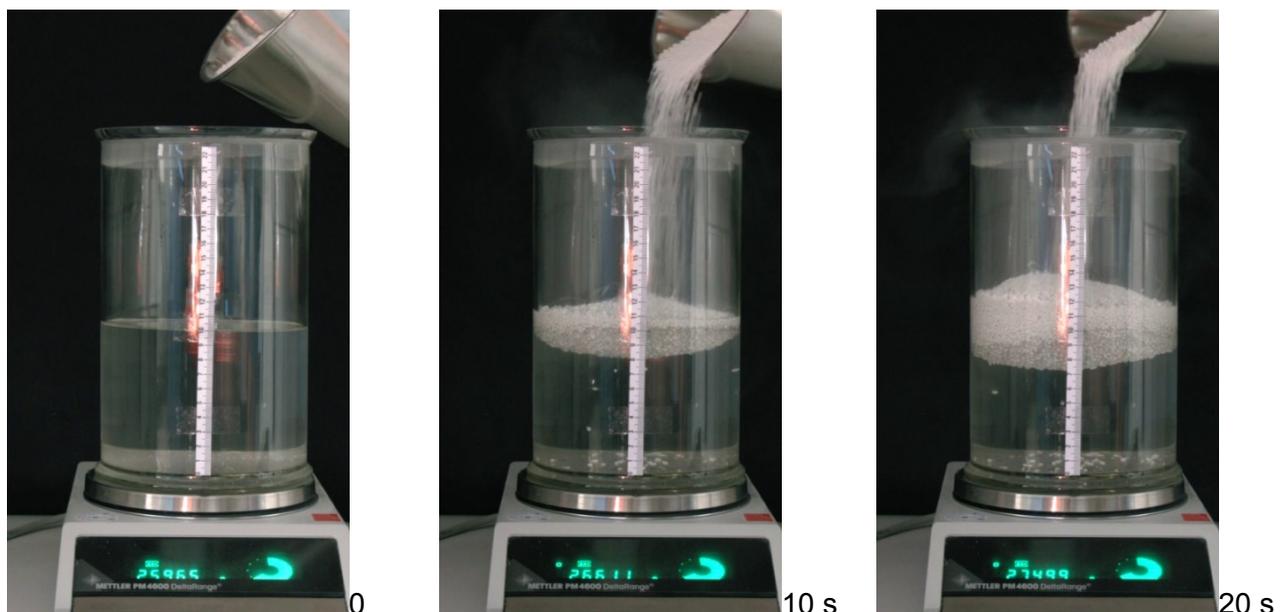
Ähnliche Untersuchungen zur Durchfeuchtung und dem Auftriebsverhalten von PyroBubbles wurden von [Pressel 2011] mit den Flüssigkeiten Wasser, Transformatorenöl, Benzin und 2-Propanol durchgeführt. Er beurteilte die Durchfeuchtung anhand der Ausbildung von vier unterschiedlich feuchten Schichten über der Flüssigkeit, einer gesättigten nassen Schicht,

einer helleren Schicht mit Gasblasen, einer feuchten und einer trockenen Schicht. U. a. ermittelte er die Schichtdicken für die trockenen PyroBubbles. Auch seine Untersuchungen basieren auf den Beobachtungen an der Behälterwand.

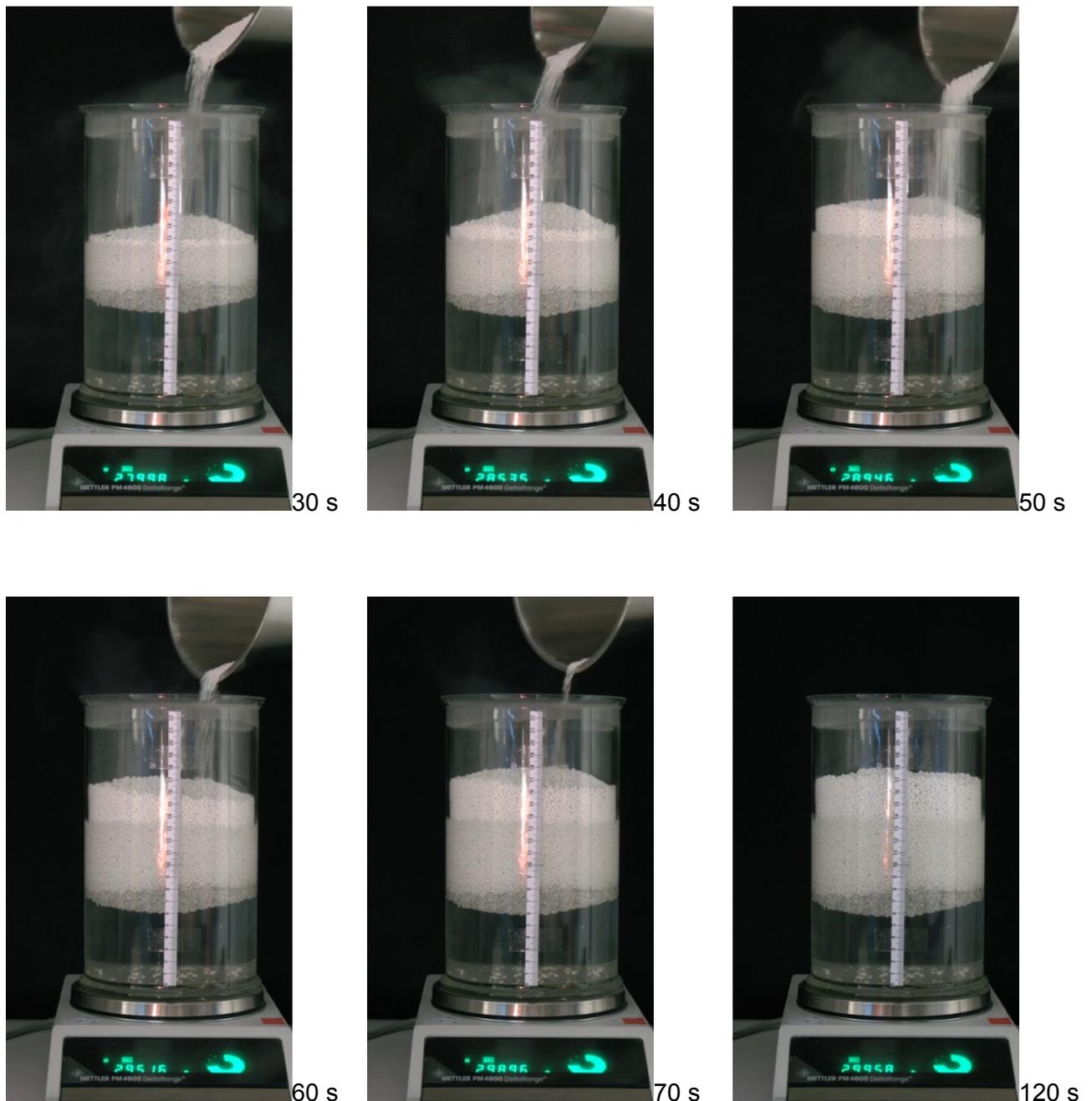
Neben der Schwimmfähigkeit der PyroBubbles ist von Interesse, ob und wie lange die PyroBubbles eine Isolationsschicht darstellen. Dazu dienen die Verdunstungsversuche. Da das Produkt PyroBubbles durchaus in unterschiedlichen Korngrößenbereichen lieferbar ist und auch unterschiedliche Angaben zu Korngrößenbereichen in Datenblättern zu finden sind, sollte der mögliche Einfluss der Korngröße des Materials in den Laboruntersuchungen berücksichtigt werden. Daher wurden zunächst Siebanalysen des gelieferten Produkts durchgeführt und dann Fraktionen bestimmter Korngröße für Laborversuche ausgesiebt.

Für die Siebanalyse wurden aus den vorhandenen PyroBubbles drei Proben von ca. 2 l entnommen. Es wurden Rüttelversuche mit Siebgrößen von 3,15 mm, 2 mm und 1 mm durchgeführt. Die ermittelten Werte von Masse und Volumen der einzelnen Fraktionen sind in Tabelle A 1.1 im Anhang aufgeführt. Betrachtet man den Mittelwert dieser drei Analysen, so ergibt sich für das Gemisch eine Schüttdichte von 0,236 g/ml. Zirka 8,7 % des Gesamtvolumens nehmen PyroBubbles mit einer Korngröße von mehr als 3,15 mm ein, 40 % des Volumens besteht aus Granulat im Größenbereich von 2 bis 3,15 mm, 47 % haben die Korngröße von 1 bis 2 mm und der Rest von 4 % des Gesamtvolumens entfällt auf Granulat kleiner als 1 mm. Das bedeutet, dass das PyroBubble Gemisch zu 90 % aus 1 bis 3,15 mm großen Körnern besteht.

Die Aufschüttung der PyroBubbles für die Siebfraction von 2 bis 3,15 mm ist in den Videoschnappschüssen im Bild 2.2 dargestellt. Der Einfüllvorgang dauert länger (70 s) und infolge der Siebung ist eine deutlich geringere Staubentwicklung vorhanden. Nach Beenden des Einfüllvorganges ist auch hier ein Flüssigkeitsfüllstand von 14 cm zu erkennen. Dieser bleibt in der Folge auch so bestehen. Die Verteilung des Granulats ist gleichmäßiger, so dass eine Dicke der noch trockenen PyroBubbleschicht von ca. 4 cm abgelesen werden kann. In diese Schicht wird die Flüssigkeit penetrieren.



**Bild: 2.2:** Momentaufnahmen des Einfüllvorgangs der PyroBubbles für die Siebfraction 2 – 3,15 mm auf Heptan (Teil 1)



**Bild: 2.2:** Momentaufnahmen des Einfüllvorgangs der PyroBubbles für die Siebfraktion 2 – 3,15 mm auf Heptan (Teil 2)

### 2.1.2 Verdunstungsversuche

Für die Verdunstungsversuche wurden Glaszylinder und eine Waage im Abzug positioniert. Der Glaszylinder hat einen Innendurchmesser von 14 cm und eine Gesamthöhe von 25 cm, die einen Füllstand von ca. 23 cm ermöglicht. Der Glaszylinder wurde bis zur Füllstandshöhe von 10 cm mit Flüssigbrennstoff (Ethanol und Heptan) befüllt und darauf eine Schicht definierter Dicke (5 cm und 10 cm) Granulat aufgeschüttet. Die Erfassung der Massenänderung erfolgte über die Dauer von ca. 6 h im Zeitintervall von 15 bis 30 Minuten

(bei manueller Messwertübertragung). Für einzelne Versuche wurde mittels elektronischer Messwertübertragung die Messwerterfassung im 30s-Takt realisiert.

Es wurden Wägungen mit Betrieb des Abzuges (571 m<sup>3</sup>/h) und ohne Absaugung durchgeführt.

Nachfolgend sind einige Ergebnisse der Laboruntersuchungen, bei denen die Art des Flüssigbrennstoffs, die Dicke der PyroBubbleschicht, deren Korngröße sowie die Belüftung variiert wurden, anhand der ermittelten Verdunstungsraten und der daraus berechneten Verdunstungsintensität (auf die Verdampfungsfläche bezogene Verdunstungsrate) dargestellt. Die Verwendung der Verdunstungsintensität erlaubt den Vergleich mit Experimenten anderer Abmessungen.

Die in der Spalte 5 (Verdunstungsintensität) aufgeführten Werte sind Mittelwerte aus den gemessenen Massenänderungen. Eine allmähliches Ansteigen der Massenverlustrate ist nur in Einzelfällen zu beobachten bzw. sehr schwach ausgeprägt. Eine Ursache dafür liegt auch in der zu geringen Auflösung der Massenwägung, die eine größere Zeitschrittweite für die Messwerterfassung erfordert.

**Tabelle 2.1:** Versuche mit Bioethanol im Glaszylinder beim Betrieb des Abzuges

Nr.	Versuch	PyroBubble-schichtdicke	Korngröße	Verdunstungsintensität* in g/(m <sup>2</sup> min)
Versuche im Abzug mit Absaugung (571 m <sup>3</sup> /h), Waage im Abzug				
1	VE_Zyl_Pyro5cm_mix	Ethanol/5 cm	gemischt	10
2	VE_Zyl_Pyro10cm_mix	Ethanol/10 cm	gemischt	1,3
3	VE_Zyl_Pyro5cm_2mm	Ethanol/5 cm	2 mm	9,3
4	VE_Zyl_Pyro10cm_2mm	Ethanol/10 cm	2 mm	1,35
5	VE_Zyl_Pyro5cm_3mm	Ethanol/5 cm	3 mm	7,9** 9,4***
6	VE_Zyl_Pyro10cm_3mm	Ethanol/10 cm	3 mm	0,9
7	VE_Zyl_Pyro5cm_1mm	Ethanol/5 cm	1 mm	12,1
8	VE_Zyl_Pyro10cm_1mm	Ethanol/10 cm	1 mm	2,1
9	VE_Zyl_10cm_ohnePyro	Ethanol/-	ohne	19,1

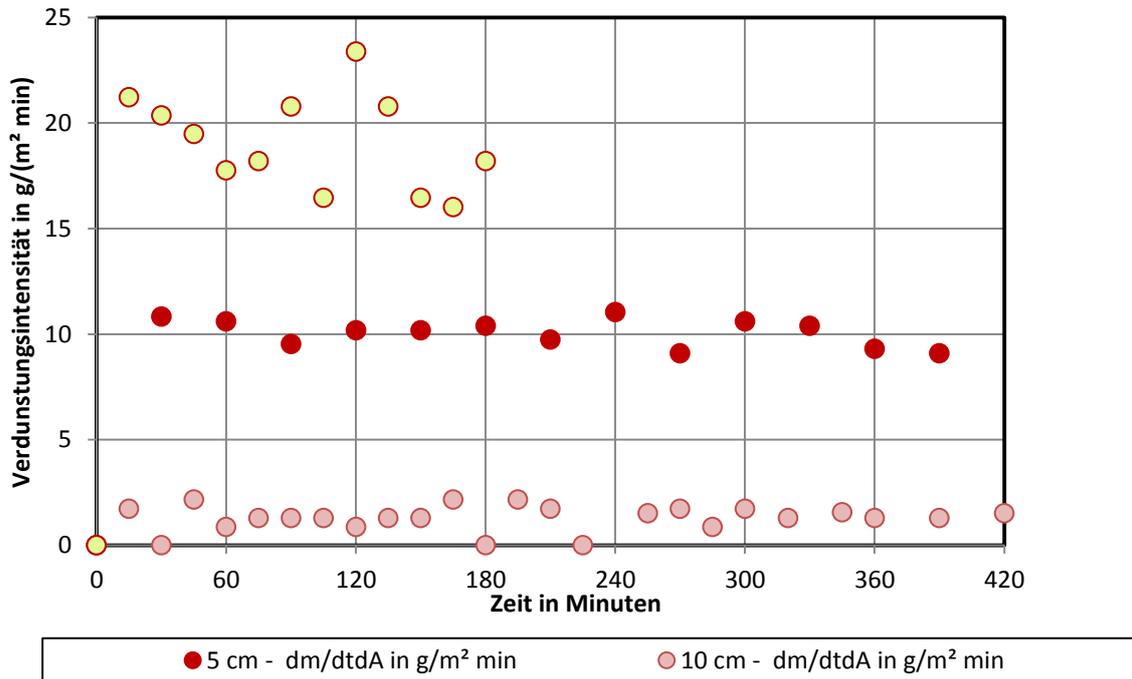
\* Mittlere Verdunstungsintensität  $I_V$  nach Formel:  $I_V = \frac{m_0 - m_{end}}{t_{end} - t_0} \cdot \frac{1}{A_0}$

\*\* nicht konstant über die Versuchsdauer, erst nach 150 min (bis dahin ansteigend)

\*\*\* Verdunstungsintensität im Zeitintervall von 150 bis 420 min

Versuche mit der PyroBubble-Mixture unterschiedlicher Schichtdicke sind die Versuche 1 und 2. Bild 2.3 zeigt ein Diagramm mit den ermittelten Verdunstungsintensitäten im Vergleich zu der bei freier Oberfläche. Die kleinste Verdunstungsrate (gute Abschottung) zeigt sich erwartungsgemäß bei der 10 cm dicken PyroBubbleschicht. Auch die nur 5 cm dicke PyroBubbleschicht schottet noch ab, verglichen mit der Verdunstung der freien Oberfläche mit einer Intensität von ca. 19 g/(m<sup>2</sup> min).

**Ethanolverdunstung Glaszylinder (154 cm<sup>2</sup>)  
mit Pyrobubbleschicht von 5 cm und 10 cm und freier Oberfläche**

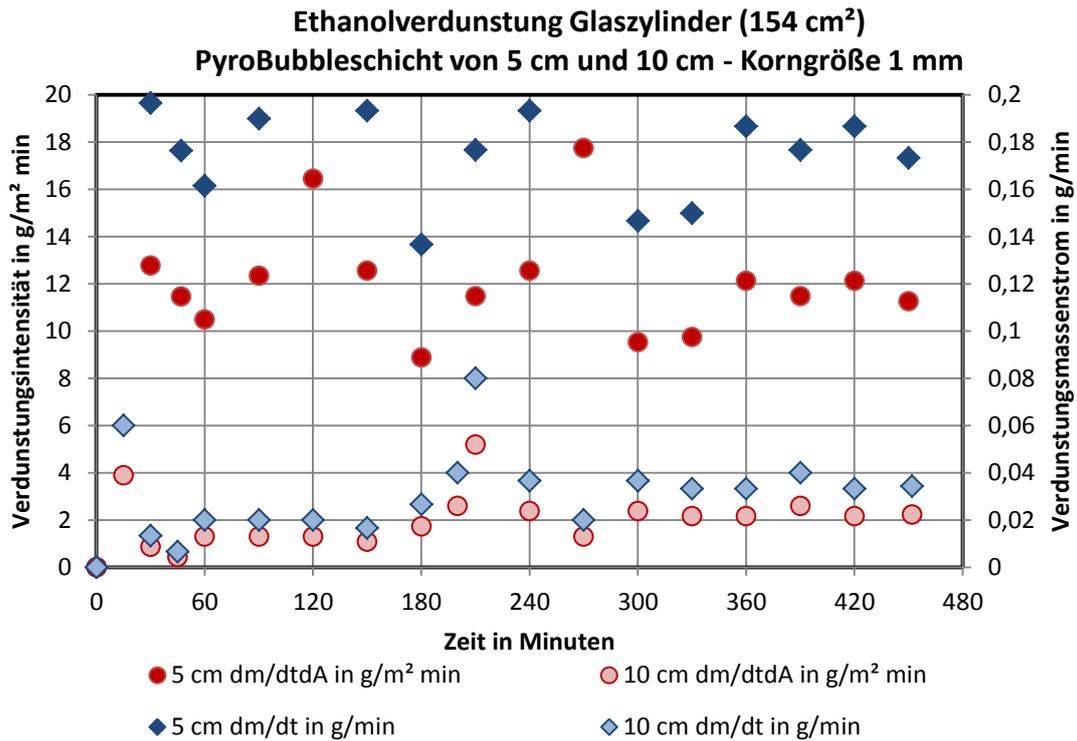


**Bild: 2.3:** Gegenüberstellung der Verdunstungsintensitäten für die freie Oberfläche, die 5 cm-Schicht und die 10 cm-Schicht der PyroBubbles (Mix)

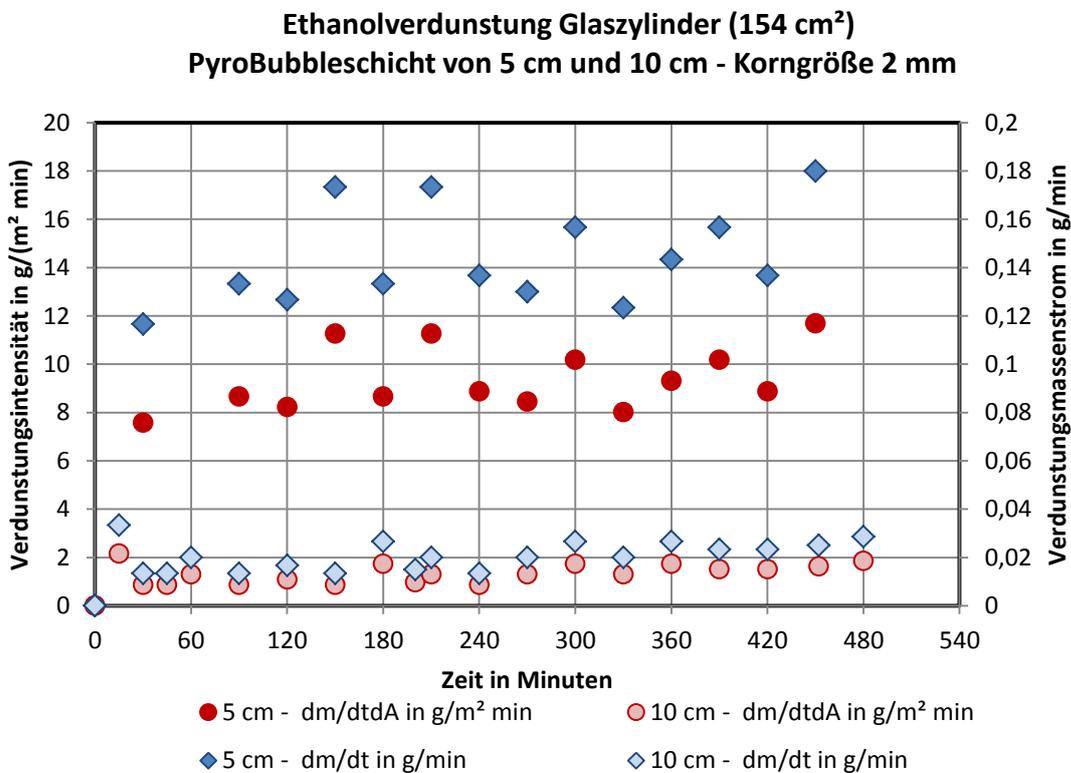
Versuche, bei denen an Stelle der gemischten Korngrößen, die laut Hersteller den Bereich von 0,5 bis 5 mm umfassen, Siebfraktionen verwendet wurden, zeigen gleiches Verhalten und Verdunstungsraten in gleicher Größenordnung.

Die Ergebnisse der Verdunstungsexperimente mit PyroBubbles aus einer 1 mm Siebung und einer 2 mm Siebung sind in den Diagrammen in den Bildern 2.4 und 2.5 grafisch dargestellt.

Die 1 mm Siebfraktion umfasst einen Korngrößenbereich von >1 mm bis 2 mm und wurde in den Versuchen 7 und 8 benutzt. Bei 10 cm dicker Schicht wurde eine mittlere Verdunstungsrate von 2,1 g/(m<sup>2</sup> min) gemessen, bei der nur 5 cm dicken Schicht erfolgte die Verdunstung mit der mittleren Intensität von 12,1 g/(m<sup>2</sup> min) immer noch in geringerem Ausmaß als bei freier Oberfläche. Der Verlauf ist im Bild 2.4 zu sehen.



**Bild 2.4:** Gegenüberstellung der Verdunstungsraten und -intensitäten bei 5 und 10 cm Schichtdicke der PyroBubbles (1 mm)

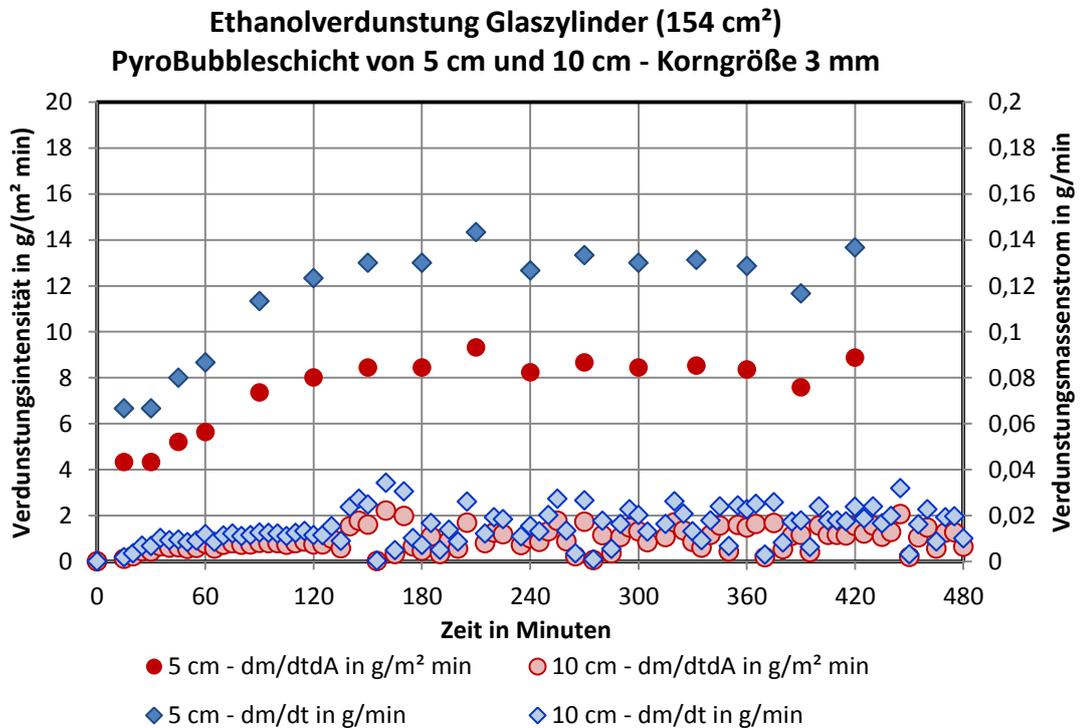


**Bild 2.5:** Gegenüberstellung der Verdunstungsraten und -intensitäten bei 5 und 10 cm Schichtdicke der PyroBubbles (2 mm)

Bild 2.5 zeigt das Diagramm mit den Werten der Verdunstungsrate und -intensität für PyroBubbles aus der 2 mm Siebung für die beiden unterschiedlichen Schichtdicken von 5 und 10 cm. Die verwendete Siebfraktion besteht aus Körnern von >2 mm bis 3,15 mm Größe. Auch hier werden für die Verdunstungsrate und -intensität Werte in gleicher Größenordnung erhalten (vgl. Tabelle 2.1, Versuche 3 und 4).

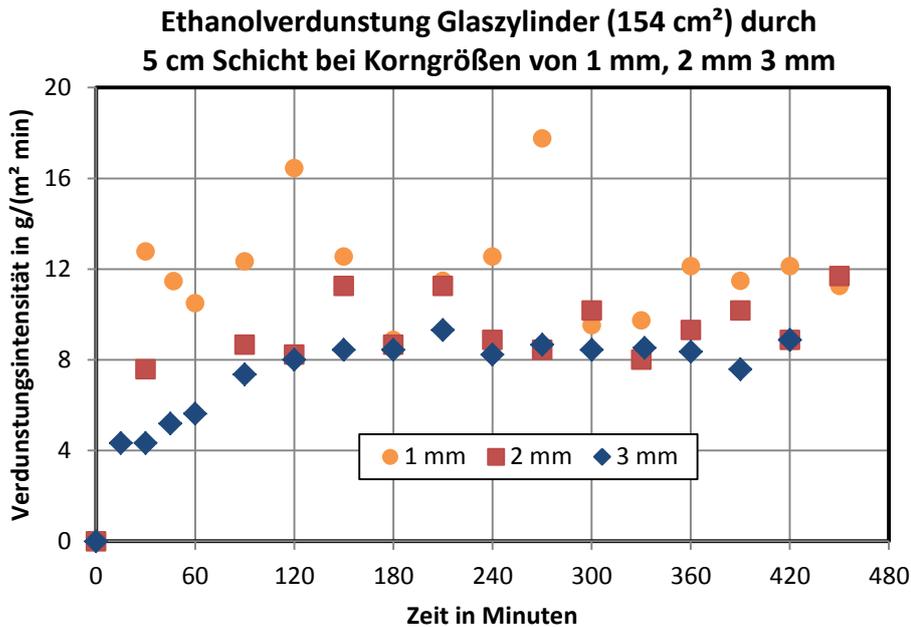
Das nicht unterschiedliche Verhalten der 1 mm und 2 mm Siebung im Vergleich zum Gemisch erklärt sich aus der Siebanalyse, die ergab, dass 90 % des Gesamtvolumens aus PyroBubbles im Korngrößenbereich von 1 bis 3,15 mm bestehen.

Im Bild 2.6 ist der zeitliche Verlauf der Verdampfungsrates und -intensität für eine 3 mm-Siebfraktion (5 cm Schicht) dargestellt. Hier zeigt sich ein Anstieg der Verdunstungsintensität auf den maximalen Wert von ca. 8 g/(m<sup>2</sup> min) über die Dauer von 2 Stunden. In den vorangegangenen Versuchen wurde der maximale Wert meist sehr früh und dann zwar fluktuierend doch in gleicher mittlerer Höhe erreicht.



**Bild: 2.6:** Verdunstungsrate und –intensität von Ethanol im Glaszylinder durch eine 5 cm dicke PyroBubbleschicht mit Korngröße >3,15 mm

Das folgende Diagramm im Bild 2.7 zeigt einen Vergleich der Verdunstungsintensität von Ethanol bei Bedeckung mit einer 5 cm dicken Schicht bei unterschiedlich feiner Körnung (Fraktionen aus 1 mm, 2 mm und 3,15 mm Siebung).



**Bild: 2.7:** Verdunstungsintensität von Ethanol im Glaszylinder durch eine 5 cm dicke PyroBubbleschicht mit verschiedener Körnung

Es fällt auf, dass die Fluktuationen bei den Messwerten im Versuch mit den kleinsten Körnern am größten sind und mit zunehmendem Durchmesser abnehmen. Bei den größten PyroBubbles wird die kleinste Verdunstungsrate erzielt. Weitere Untersuchungen sind zur Bestätigung nötig.

Bei ausgeschaltetem Abzug findet der Stoffaustausch mit der ruhenden Luft statt. Es wurden mit Ethanol für eine 5 cm dicke PyroBubbleschicht für zwei verschiedene Körnungen (Siebung 1 mm und 2 mm) die Verdunstungsintensitäten bestimmt. Diese liegen mit 0,88 und 0,9 g/(m<sup>2</sup> min) in gleicher Größenordnung und unterscheiden sich kaum von der bei freier Oberfläche.

Eine Übersicht der durchgeführten Laborversuche mit Heptan zeigt die Tabelle 2.2.

**Tabelle 2.2:** Versuche mit Heptan im Glaszylinder bei ruhendem Abzug

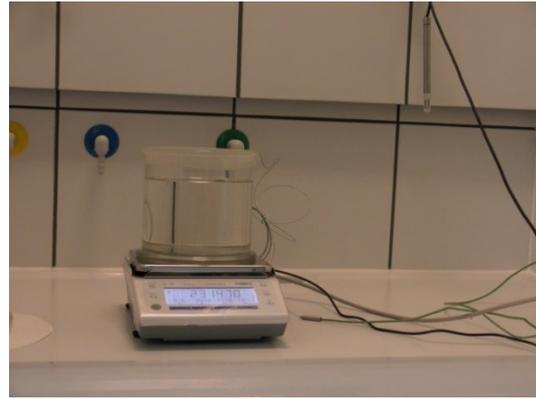
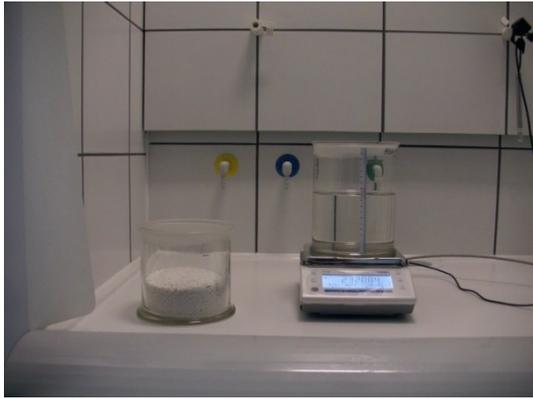
Nr.	Versuch	PyroBubble-Schichtdicke	Korngröße	Verdunstungsintensität* in g/m <sup>2</sup> min
Versuche im Abzug ohne Absaugung, Waage im Abzug				
19	Heptan_Zyl_H15cm+Pyro	5 cm	Mix	≈3
20	Heptan_Zyl_H20cm+Pyro	5 cm	Mix	1,76
21	Heptan_Zyl_H25cm+Pyro	5 cm	Mix	1,1
22	Heptan_Zyl_H20cm	0	-	1,3
23	Heptan_Zyl_H20cm+Pyro	5 cm	Mix	1,8
24	Heptan_Zyl_H25cm	0	-	1,06
25	Heptan_Zyl_H25cm+Pyro10	10 cm	Mix	1,6
26	Heptan_Zyl_H25cm+Pyro10,1	10 cm	1 mm	1,62
27	Heptan_Zyl_H25cm+Pyro10,2	10 cm	2 mm	1,7
28	Heptan_Zyl_H25cm+Pyro10,3	10 cm	3 mm	1,5
29	Heptan_Zyl_H25cm+Pyro10,4	10 cm	4 mm	1,6

\* Mittlere Verdunstungsintensität  $I_V$  nach Formel:  $I_V = \frac{m_0 - m_{end}}{t_{end} - t_0} \cdot \frac{1}{A_0}$

Die ermittelten Werte unterscheiden sich nur unwesentlich voneinander. Die Verdunstungsraten sind vom Abstand zwischen der Verdunstungsfläche und dem Rand des Glaszylinders abhängig. So ist die Verdunstung der 10 cm Flüssigkeitssäule Heptan in einem 15 cm hohen Glaszylinder größer als die in einem 25 cm hohen Zylinder. Gleiches gilt natürlich auch, wenn die Flüssigkeit mit Granulat bedeckt ist. Damit erklärt sich, weshalb z. B. im Versuch 24 die Verdunstungsintensität bei freier Oberfläche kleiner ist als die bei Bedeckung mit PyroBubbles in den Versuchen 25 bis 29.

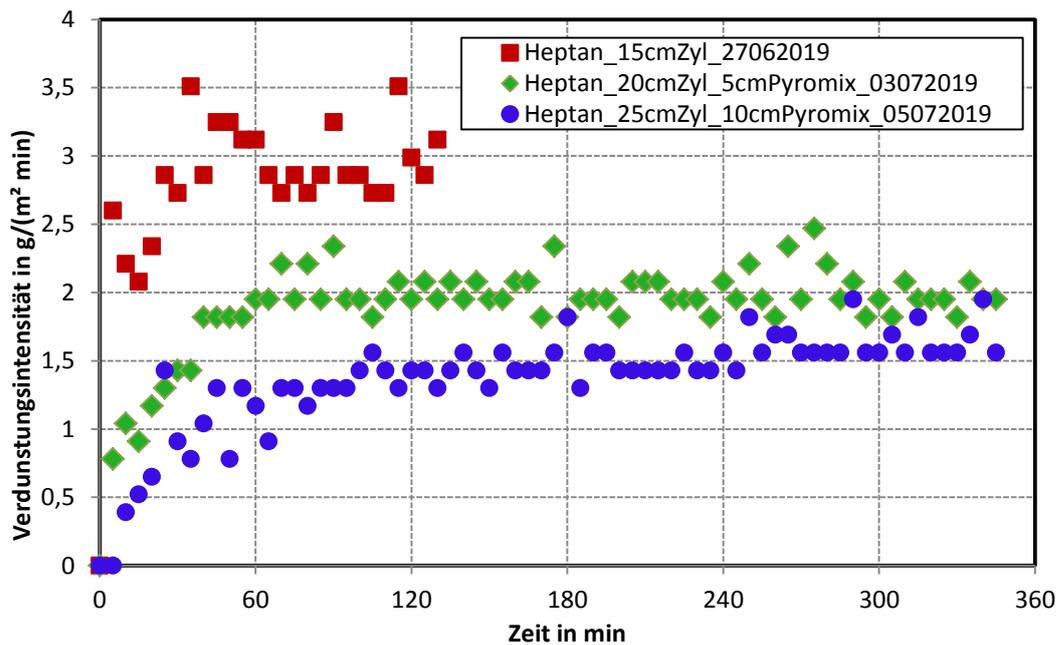
In den Versuchen 25 bis 29 wurden verschiedene Korngrößen verwendet. Auch dort ist kein Unterschied zur Verwendung des Gemischs erkennbar.

Eine Wiederholung der Heptanverdunstungsversuche mit gleichem Abstand zwischen Höhe der Oberfläche und Umgebung (freie Höhe zwischen Verdunstungsoberfläche und Höhe des Zylinders) von ca. 5 cm liefert Messwerte unter vergleichbaren Bedingungen. Die freie Verdunstung wurde im Glaszylinder von 15 cm Höhe und 10 cm Füllstand ermittelt, die Verdunstung durch die 5 cm dicke Schicht in einem 20 cm hohen Gefäß und die 10 cm dicke Schicht im Zylinder von 25 cm Höhe. Die Messwerte wurden automatisch im Zeitintervall von 30 s über die Dauer von 6 Stunden erfasst. Bild 2.8 zeigt den Messplatz mit der Messwernerfassung.



**Bild 2.8:** Versuchszplatz zur Messwerterfassung im Abzug bei geöffneter Abzugshaube ohne Absaugung (links: Versuchsvorbereitung, rechts: Temperatur- und Massenverlustmessung ohne Abdeckung)

In Bild 2.9 sind die Verdunstungsintensitäten in ruhender Umgebung (Abzug offen und ausgeschaltet) gegenübergestellt. Es zeigt die erwartete geringste Verdunstungsintensität bei 10 cm dicker Schicht, die nur wenig größere Intensität bei 5 cm Bedeckung und die größte bei freier Verdunstung in die ruhende Umgebung.



**Bild 2.9:** Verdunstungsintensität von Heptan im Glaszylinder von 14 cm Durchmesser für freie Verdunstung und bei Bedeckung mit 5 cm und 10 cm dicker PyroBubbleschicht (Mix)

## 2.2 Versuche mit Blähglasgranulat und Mikro-Glashohlkugeln

Analog zu den Versuchen mit PyroBubbles wurden Verdunstungsversuche mit Blähglasgranulat und Mikro-Hohlglaskugeln unter laufendem Abzug durchgeführt.

Es wurde ein Blähglasgranulat verwendet, das unter dem Namen NEBUFIGHT in unterschiedlichen Korngrößenbereichen erhältlich ist. Es standen kleine Mengen dieses neuartigen Löschmittels in den Korngrößenbereichen 1-2 mm und 2-4 mm zur Verfügung. Dieses Granulat wurde analog zu den PyroBubbles einer Siebanalyse unterzogen. Die Werte dazu sind im Anhang in Tabelle A1.2 aufgeführt.



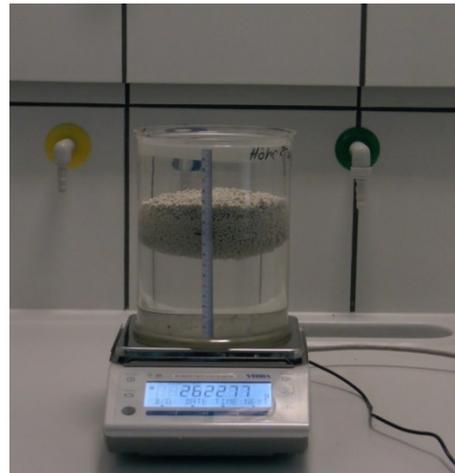
**Bild 2.10:** NEBUFIGHT der Körnung 1-2 mm nach Siebanalyse

In den Versuchen wurde der Korngrößenbereich 2-4 mm verwendet, um eine Vergleichbarkeit mit der PyroBubble Mischung herzustellen.

Für die Versuche mit Mikro-Glashohlkugeln standen herstellungsbedingt Teilchen im Größenbereich von 30 bis 120  $\mu\text{m}$  Durchmesser zur Verfügung.

### 2.2.1 Versuche mit NEBUFIGHT Granulat

Die Verdunstungsversuche wurden im Glaszylinder mit dem Durchmesser von 14 cm und der Höhe von 20 cm durchgeführt. Auf das Ethanol mit der Füllstandshöhe von 10 cm wurde eine 5 cm dicke Schicht an NEBUFIGHT Granulat aufgeschüttet, wie im Bild 2.12 zu sehen ist und die Massenänderung über die Dauer von 6 h elektronisch erfasst



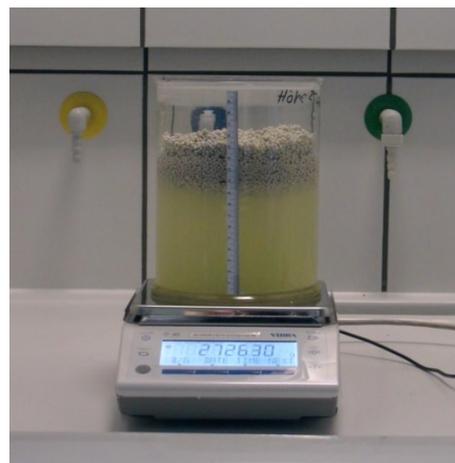
**Bild 2.11:** Verdunstungsversuch mit NEBU-FIGHT Granulat (links: Vorbereitung, rechts: Messwerterfassung)

Anhand des Anfangs- und Endwertes der Masse über die Verdunstungsdauer lässt sich eine mittlere Verdunstungsintensität von  $6,3 \text{ g}/(\text{min m}^2)$  für die Verdunstung des Ethanol durch eine 5 cm dicke Granulatschicht ermitteln. Infolge der Schwankungen des Ablüfters konnten die Messdaten nicht genauer ausgewertet werden.

### 2.2.2 Versuche mit NEBU-FIGHT Granulat und Binder

Die beabsichtigten Abschottungseigenschaften werden laut Hersteller erst bei Verwendung des speziellen Binders wirksam. Für den Verdunstungsversuch mit Ethanol und NEBU-FIGHT Granulat mit Binder wurde zunächst das Granulat mit dem Binder vermischt und dieses Gemisch dann auf die Flüssigkeit aufgebracht.

Für die Mischung wurden 100 ml des NEBU-FIGHT Binders auf ca. 770 ml Granulat (5 cm Schicht) verwendet. Die Vermischung wurde durch Rühren im Becherglas hergestellt.



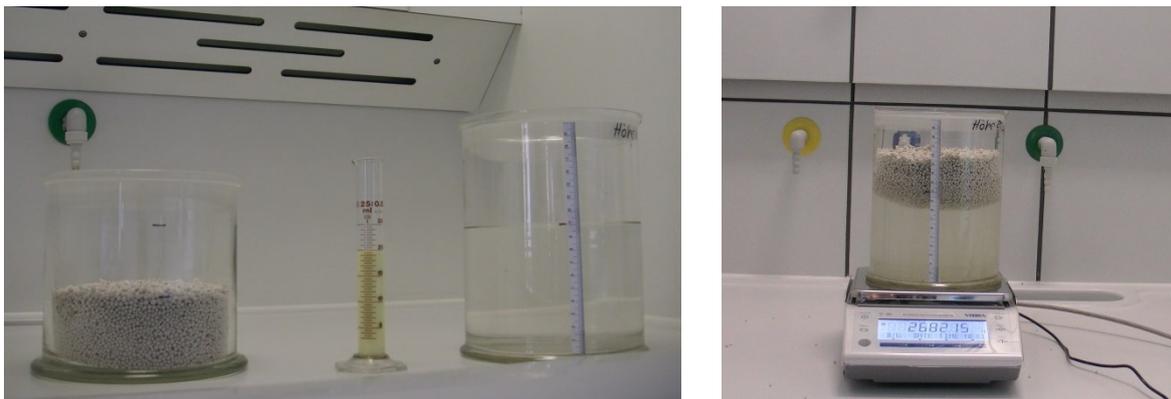
**Bild 2.12:** Verdunstungsversuch mit NEBU-FIGHT Granulat und NEBU-FIGHT Binder (links: Mischungsbestandteile, rechts: Messwerterfassung) mit Abzug

Die Abbildung auf der rechten Seite von Bild 2.12 zeigt die Einfärbung des Flüssigbrennstoffs durch den überschüssigen Binder. Auch die Verdunstungsversuche mit Binder wurden bei eingeschaltetem Abzug durchgeführt und ein mittlerer Wert für die Massenänderung erfasst.

Die für die Verdunstungsdauer von 6 h ermittelte mittlere Verdunstungsintensität bei Verwendung einer mit Binder getränkten Granulatschicht beträgt  $2,95 \text{ g}/(\text{min m}^2)$  und ist damit um die Hälfte geringer als bei reinem Granulat.

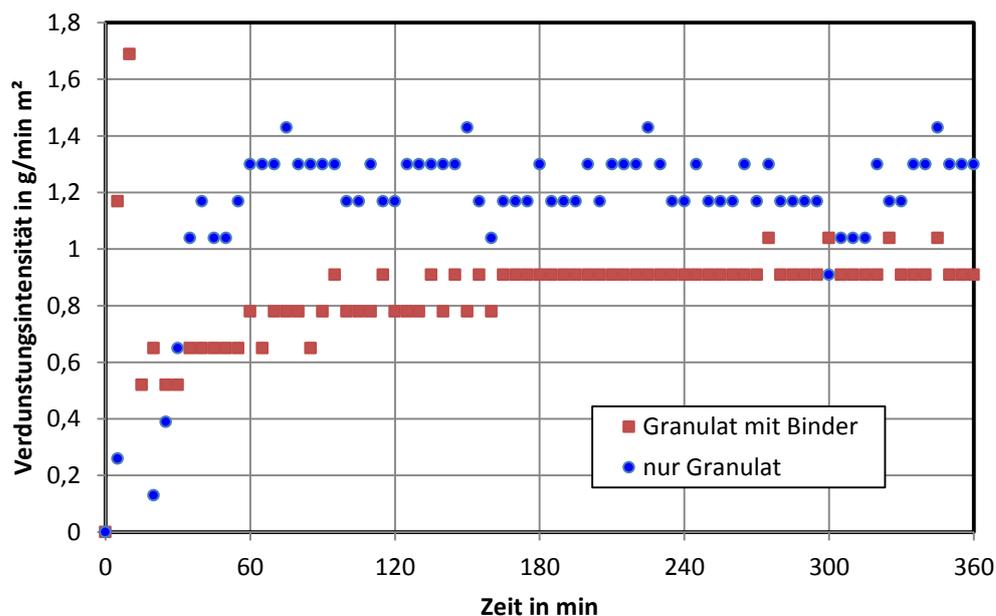
Bei Verwendung von PyroBubbles zur Abdeckung des Flüssigbrennstoffs beträgt die Verdunstungsintensität das Dreifache der bei Verwendung von NEBUFIGHT mit Binder ermittelten.

Nachfolgend wurde die Ermittlung des Verlaufs der Verdunstungsintensität von Ethanol unter NEBUFIGHT Granulat bei ruhendem Abzug vorgenommen. Dabei wurde bei Anwendung des Granulats mit Binder das empfohlene Mischungsverhältnis von 100 ml Binder auf 5 Liter Granulat verwendet.



**Bild 2.13:** Verdunstungsversuch mit NEBUFIGHT Granulat und NEBUFIGHT Binder bei ruhendem Abzug (links: Mischungsbestandteile, rechts: Messwerterfassung)

Die aus den Massewägungen ermittelten Verläufe der Verdunstungsraten sind im Diagramm in Bild 2.15 grafisch dargestellt. Es wurden die Messwerte im Intervall von 5 Minuten benutzt.



**Bild 2.14:** Verdunstungsintensitäten von Ethanol unter Abdeckung mit NEBUFIGHT bei ruhender Umgebung

Erwartungsgemäß ist bei ruhender Umgebung eine sehr geringe Verdunstungsintensität festzustellen. Ohne Verwendung des Binders steigt die Intensität innerhalb einer Stunde auf einen Wert von  $1,2 \text{ g}/(\text{min m}^2)$  an und bleibt dann in der Größenordnung von  $1,2$  bis  $1,4 \text{ g}/(\text{min m}^2)$  bestehen.

Bei Verwendung des Granulats mit Binder verbessert sich das Abschottungsverhalten. Der Anstieg der Verdunstungsrate erfolgt über eine längere Zeit und erreicht einen geringeren Maximalwert. Die mittlere Verdunstungsintensität wurde für Granulat mit Binder ohne Flammeneinfluss mit  $0,86 \text{ g}/(\text{min m}^2)$  ermittelt.

### 2.2.3 Versuche mit Mikro-Glashohlkugeln

Als weiteres Feststoffschaummittel wurden die Mikro-Glashohlkugeln hinsichtlich ihrer Dämmeigenschaften untersucht. Analog zu den vorangegangenen Versuchen wurde die Verdunstung von Ethanol durch eine 5 cm dicke Schicht aus Mikro-Glashohlkugeln im Durchmesserbereich von 30 bis  $120 \mu\text{m}$  ermittelt. Die Glashohlkugeln verhalten sich wie Staub. Das Aufbringen einer Schicht dieses Glaskugelstaubes erfolgte mittels Schaufel, da sich kein kontinuierliches Fließverhalten einstellte. Bild 2.15 zeigt die auf der Flüssigkeitsoberfläche aufgebrachte Schicht des Glaskugelstaubes im Glaszylinder und in einer Nahansicht dessen schaumartige Konsistenz.

Die Verdunstungsversuche mit den Glashohlkugeln wurden unter laufendem Abzug durchgeführt. Entgegen den Erwartungen blieb der Glaskugelstaub auf der Flüssigkeitsoberfläche haften und wurde nicht von der Luftbewegung erfasst.

Es wurde nach 6 Stunden Verdunstungsdauer eine mittlere Verdunstungsintensität von  $10,4 \text{ g}/(\text{min m}^2)$  registriert. Diese liegt ungefähr in der Größenordnung der bei den PyroBubbles erreichten Verdunstungsintensität von ca.  $9 \text{ g}/(\text{min m}^2)$ .

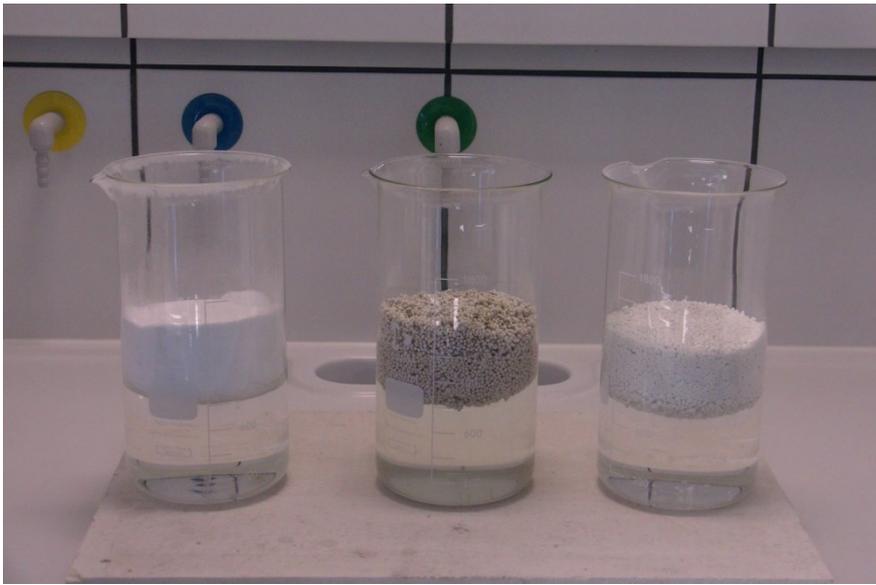


**Bild 2.15:** Verdunstungsversuch mit Mikro-Glashohlkugeln (links: Messwertfassung, rechts: Oberfläche)

## 2.2.4 Vergleich

In vergleichenden Untersuchungen der drei verschiedenen Löschmittel PyroBubbles, NEBUFIGHT Granulat und Mikro-Glashohlkugeln wurden die mittleren Verdunstungsraten und das Zündverhalten gegenübergestellt.

Jedes der drei Löschmittel wurde auf Ethanol aufgebracht und eine mittlere Verdunstungsintensität über die Dauer von 2 h ermittelt. Danach wurde die Zündfähigkeit über der Granulat- bzw. Schaumschicht geprüft.



**Bild 2.16:** Probengefäße mit Ethanol und Abdeckung mit Mikro-Glashohlkugeln, NEBUFIGHT Granulat und PyroBubbles (v.l.n.r.)

Im Bild 2.16 sind die unterschiedlichen Proben abgebildet. Die Messzylinder haben einen Durchmesser von 11,5 cm und wurden mit einer 5 cm dicken Schicht des Löschmittels auf Ethanol gefüllt. Von links nach rechts ist die Abdeckung mit den Mikro-Glashohlkugeln, mit den NEBUFIGHT Körnern einschließlich des Binders sowie mit den PyroBubbles (Mischung aller Korngrößen) zu sehen.

Der Zündtest nach einer Verdunstungsdauer von 2 h bei ausgeschaltetem Abzug, zeigte die Durchlässigkeit der Abdeckung sowohl bei den PyroBubbles als auch bei den Glashohlkugeln. Die Abdeckung durch das NEBUFIGHT Granulat mit Binder erwies sich als wirksam.



**Bild 2.17:** Fotos der Zündtests bei Mikro-Glashohlkugeln, PyroBubbles und NEBUFIGHT Granulat (v.l.n.r.)

Im Anschluss wurde die Verdunstungsintensität über eine Dauer von 3 h bei laufendem Abzug als mittlere Größe aus Anfangs- und Endwert von Masse und Zeit ermittelt.

Der nach dieser Zeit vorgenommene Zündtest über der NEBUFIGHT Granulatabdeckung führte ebenfalls nicht zur Zündung.

Die ermittelten mittleren Werte der Verdunstungsintensität aus den Tests sind in Tabelle 2.3 aufgeführt.

**Tabelle 2.3:** Mittlere Werte der Verdunstungsintensität von Ethanol bei Abdeckung durch verschiedene Löschmittel bei der Schichtdicke von 5 cm

Löschmittel	Belüftung	Messdauer in min	Verdunstungsfläche in m <sup>2</sup>	Verdunstungsintensität in g/(min m <sup>2</sup> )
Glashohlkugeln	ohne	120	0,01038689	1
PyroBubbles (Mischung)	ohne	120	0,01038689	0,83
NEBUFIGHT (mit Binder)	ohne	120	0,01038689	0,59
Glashohlkugeln	mit Abzug 571 m <sup>3</sup> /h	180	0,01038689	13,3
PyroBubbles (Mischung)	mit Abzug 571 m <sup>3</sup> /h	180	0,01038689	11,6
NEBUFIGHT (mit Binder)	mit Abzug 571 m <sup>3</sup> /h	180	0,01038689	3,2

### 2.3 Zusammenfassung der Laborversuche

Nach Auswertung der Laborversuche lassen sich folgende Thesen aufstellen:

- je kleiner der Durchmesser desto größer die Verdunstungsrate,
- die Verdunstungsrate bei laufendem Abzug ist um ca. eine Zehnerpotenz höher,
- die niedrigste Verdunstungsrate wird mit dem NEBUFIGHT Granulat erreicht. Dies ist den spezifischen Eigenschaften des Granulats und des Binders geschuldet.

Bezüglich der Brandtests im Labormaßstab ist festzustellen, dass unter den gewählten Bedingungen die Löschung nur mit NEBUFIGHT gelingt.

Die Handhabung der Löschmittel ist mit einer Staubentwicklung verbunden und bedingt entsprechende Arbeitsschutzmaßnahmen.

Nach der Bedeckung der brennbaren Flüssigkeiten mit den getesteten Löschmitteln werden diese mit Flüssigkeit durchsetzt und haften an diesen, so dass eine umweltgerechte Entsorgung der Löschmittel erforderlich ist.

### 3 Versuche im Technikumsmaßstab

Die Zulassungstests der MPA Dresden zeigten, dass Flüssigkeitsbrände bis zu einer Größe des Brandobjekts 113 B, das eine mit 75 l Heptan befüllte Brandwanne von 2,1 m Durchmesser beschreibt, durch Aufschütten über eine Schurre mit PyroBubbles gelöscht werden konnten.

Bei stationären Löschanlagen kommen z. B. Schüttvorrichtungen zur Ausbringung der PyroBubbles zum Einsatz, mit denen eine optimale Verteilung dieses Löschmittels bzw. eine vollständige Befüllung von Schächten, Kanälen und Räumen erzielt wird, so dass die Brandlöschung erfolgt.

Im mobilen Einsatz müssen Löschergerät und das Löschmittel zum Einsatzort gebracht und dort optimal verteilt werden, um den Löscherfolg zu erreichen.

Zur Einschätzung der Eignung der PyroBubbles als Löschmittel beim mobilen Einsatz wurden deshalb Löscherversuche von Flüssigkeitsbränden analog zu den Versuchen nach EN 3 Blatt 7 für die Testung von Handfeuerlöschern durchgeführt.

Einsatzfähige mobile Löscherchnik für die Löscherung mit PyroBubbles stand zum Beginn des Vorhabens nicht zur Verfügung.

Die Genius Entwicklungsgesellschaft mbH, die Vertreibergesellschaft der PyroBubbles, verfolgt zurzeit die Entwicklung von Lösungen mittels pneumatischen Feststofftransports. So wurde z.B. eine Variante, die einen Baukompressor mit einer Düngemittelfördereinrichtung koppelt, zur Entwicklung mobiler Löscherchnik verfolgt. Erste erfolgreiche Ausblasversuche wurden von der Firma im größeren technischen Maßstab vorgeführt.

Ein zukünftiges Konzept zum Einsatz von mobiler Löscherchnik zur Brandbekämpfung für die Feuerwehr, ist in (<https://www.genius-group.de/produkte/loesungen-für-feuerwehren/>) dargestellt. Zurzeit steht diese Technik noch nicht zur Verfügung.

Darüber hinaus wurde die Entwicklung eines transportablen „Löscher“ vom Entwickler und Vertreiber der PyroBubbles initiiert. Basierend auf einem Pulverlöscher PG50 wurde ein Sonderlöscher zum Ausbringen PyroBubbles entwickelt und angeboten. Bild 3.1 zeigt dieses fahrbare Löschergerät.

Der Löschmittelbehälter fasst 50 Liter und kann damit 12,5 kg PyroBubbles aufnehmen. Das Gerät ist mit einer Druckluftflasche und Druckminderer ausgestattet, so dass die PyroBubbles mit 2 bar ausgeblasen werden. Als Löscherdüse ist ein 50 cm langes 1 Zoll Kunststoffrohr vorgesehen. Der Ausblasstrom ist mittels Kugelhahn an- und abstellbar.



**Bild 3.1:** Einsatzbereiter PyroBubblelöscher für einen Ausblasversuch

Auf einer Präsentation von Löschmittelausbringsystemen der Genius Entwicklungsgesellschaft mbH im Dezember 2016 kam gerade dieser neu entwickelte Sonderlöscher erfolgreich zur Löschung eines Metallbrandes zum Einsatz. Infolge der Nichtweiterentwicklung der Anhängerlösungen der Genius Entwicklungs mbH wurde dann auf diesen 50 l-Löscher zur Durchführung von Löschversuchen für Flüssigkeitsbrände zurückgegriffen. Von der Firma wurde der Löscher leihweise zur Verfügung gestellt, so dass die Technikumsversuche mit dieser mobilen Technik durchgeführt werden konnten.

### **3.1 Ausbringversuche zur Testung von Löschmittelreichweite, -verteilung und Auswurfzeit**

Über den mobilen Einsatz des PyroBubblelöschmittels liegen bisher wenige Erkenntnisse vor.

Um Grundparameter wie Wurfweiten, Strahlausbildung und Ausbringdauer zu bestimmen, wurden in Ausbringversuchen ohne Brand die Handhabung des Löschers sowie der erzeugte Löschmittelstrahl hinsichtlich Wurfweite, Ausbringdauer und Bedeckung getestet. Angaben dazu waren zu diesem Zeitpunkt noch nicht bekannt.

Die Löschung eines Flüssigkeitsbrandes erfordert nach [MPA 2012] eine Mindestschichtdicke von 10 cm über die gesamte Brandwannenfläche.

Es musste festgestellt werden, ob und wie diese Mindestschichtdicke mit dem mobilen Gerät erreicht werden konnte.

Dazu wurde die Befüllung einer Brandwanne von 92 cm Durchmesser mit PyroBubbles getestet, wobei eine möglichst gleichmäßige Verteilung des Granulates erzielt werden sollte.

Zunächst erfüllte das eingesetzte Löschgerät im Testversuch nicht die gestellten Erwartungen. Insbesondere die Kontinuität und Zuverlässigkeit bei der Förderung der PyroBubbles fehlte. So setzte der Förderstrom zum Teil zeitweise oder ganz aus. Momentaufnahmen, die das dokumentieren, sind in Bild 3.2 zu sehen. Für den hier

gezeigten Ausblasversuch wurde die Brandwanne ebenerdig aufgestellt, die Löschdüse (Rohr) fest eingespannt und so ausgerichtet, dass der Löschmittelstrahl auf den Wannenrand und das aufgesetzte Prallblech traf und in der Brandwanne verblieb. Nach Freigabe des Löschmittelstroms dauerte es fast 40 s, bis sich ein kontinuierlicher Förderstrom einstellte. Nach Beendigung der Löschmittelförderung über eine Dauer von 75 s verblieben noch ca. 15 Liter im Löschmittelbehälter. Eine Gleichverteilung des Löschmittels in der Brandwanne konnte nicht erzielt werden.



Beginn  
Freigabe des  
Löschmittels  
0:23



Diskontinuierliche  
Förderung und  
Ausbringung  
0:38



Beginn der  
kontinuierlichen  
Löschmittelausbringung  
1:07



Ausgebrachte  
Löschmittelmeng  
( ca.  
15 l sind im  
Löschmittelbehälter  
verblieben)

**Bild 3.2:** Momentaufnahmen erster Ausbringversuche mit dem PyroBubblelöscher

Bei weiteren Ausblasversuchen im Brandraum 1 wurde die mobile Anwendung des Löschergerätes mit und ohne Rohrverlängerung untersucht. Bild 3.3 zeigt die Versuchsanordnung für die Versuche mit fester Einspannung der Düse und Rohrverlängerung. Das Rohr wurde gewählt, um den Abstand zwischen Brand und Einsatzkraft bzw. Einsatzgerät zu vergrößern, um geringeren Wärmestrahlungsbelastungen ausgesetzt zu sein.



**Bild 3.3:** Versuchsanordnung mit fester Einspannung und Verlängerung des Düsenrohres

Im Bild 3.4 ist in der Abbildung links eine Momentaufnahme des Videomitschnitts eines Ausblasversuchs mit fester Einspannung und langem Rohr dargestellt. In dieser Anordnung wird nur eine einseitige Aufschüttung erzielt (Bild 3.4, rechts).



**Bild 3.4:** Ausblasversuch mit fester Einspannung eines langen Düsenrohres (vor Brandversuch 001)



**Bild 3.5:** Ausblasversuch mit mobilem kurzem Düsenrohr (vor Brandversuch 001)

Mit der mobilen kurzen Düse wurde zumindest im kalten Zustand, eine gleichmäßige Verteilung des Löschmittels erzielt (vgl. Bild 3.5, rechts). Hinsichtlich der Kontinuität bei der Löschmittelförderung waren keine grundlegenden Verbesserungen zu beobachten.

Erst mit einem Austauschgerät wurde ein verbessertes Ausströmverhalten erzielt. Bild 3.6 zeigt Momentaufnahmen der Löschmittelausbringung nach 10 s und nach 40 s. Nach dem ersten Druckstoß bei Freigabe des Löschmittelstroms (Öffnen des Kugelhahns) strömt das Löschmittel kontinuierlich mit hoher Geschwindigkeit aus der Rohröffnung. Nach 60 s ist das gesamte Löschmittel aus dem Behälter ausgeblasen. Damit wurde ein Löschmittelstrom von 50 l/min gefördert.



**Bild 3.6:** Momentaufnahmen des Ausbringversuchs mit PyroBubbles nach 10 s (links) und nach 40 s (rechts)

Offensichtlich war ein Defekt Ursache der unzureichenden Förderleistung beim ersten Gerät, so dass nicht prinzipiell die Leistungsfähigkeit des Löschers in Frage gestellt werden musste.

Die Problematik der Gleichverteilung des Löschmittels auf der Brandfläche blieb bestehen. Bei einer Gleichverteilung sollte in der Brandwanne von 92 cm Durchmesser eine Schicht von ca. 7,5 cm PyroBubbles vorliegen, so dass mit der Menge an Löschmittel aus einem PyroBubblelöscher kein Löscherfolg zu erwarten ist.

Als Schlussfolgerungen aus den Ausbringtests kann gezogen werden:

- Ausbringung von PyroBubbles mit Sonderlöscher ist realisierbar. 50 l werden in 1 Minute freigesetzt,
- bei fester Einspannung der Löschdüse lässt sich das Löschmittel nicht gleichmäßig auf der Fläche verteilen,
- mobiler Einsatz erfordert eine gut handhabbare kurze Düse,
- 2 Löscher werden benötigt,
- das Ausbringen der PyroBubbles ist mit einer starken Staubentwicklung verbunden,
- die durchführenden Einsatzkräfte müssen unter Nutzung von Atemschutzgeräten vorgehen.

### 3.2 Poolbrandversuche im Brandraum 1 des Brandhauses

Weitere Untersuchungen wurden in Brandversuchen in Anlehnung an den Normflüssigkeitsbrand 21 B nach DIN EN 3 Blatt 7, der eine mit Heptan befüllte Brandwanne von 0,92 m Durchmesser vorsieht, vorgenommen. Es wurden 2 unterschiedliche Versuchsanordnungen gewählt.

In der ersten Versuchsanordnung wurde mit einer fest installierten Löschdüse und zusätzlicher manueller Aufschüttung gearbeitet, in der zweiten Anordnung mit zwei mobilen Löschern. Eine Übersicht der durchgeführten Brandversuche geben die Tabellen 3.1 und 3.2.

**Tabelle 3.1:** Brand- und Löschversuche mit Versuchsanordnung 1 (1 fester Löscher und manuelle Aufschüttung)

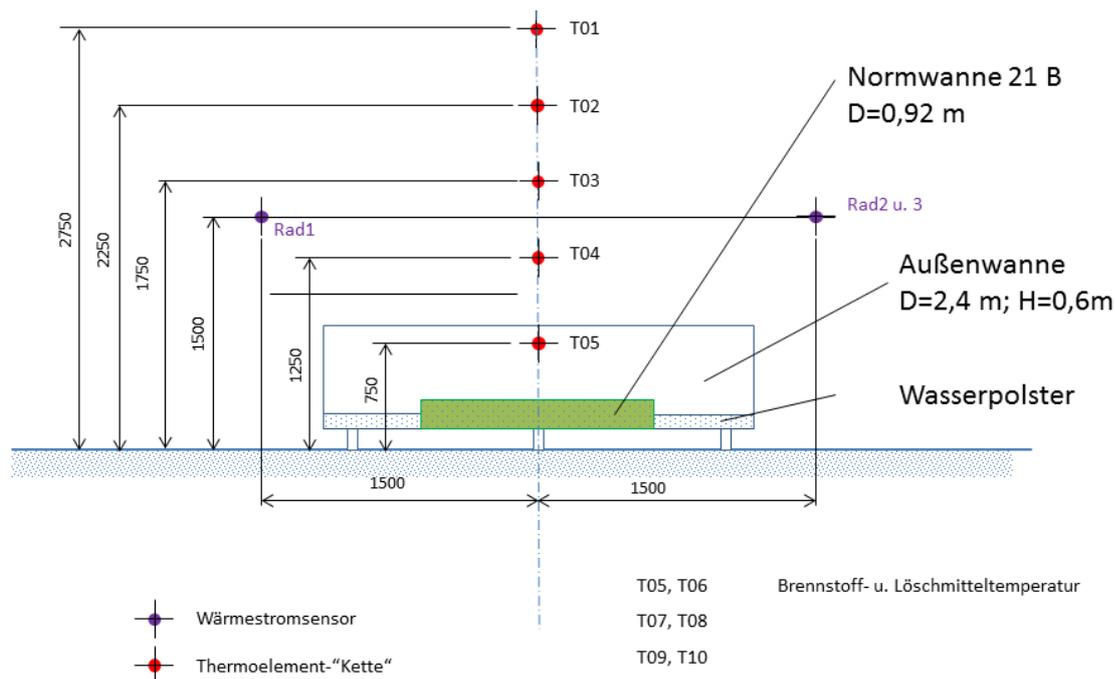
Versuch Nr.	Brennstoff	Art des Versuchs	Bemerkung
001	35 l Heptan	Erprobung der Anordnung	Löschung nach 3 min, kurzes Rohr, Strahlungsschirm, unzureichender Löschmittelstrom Branddauer 9 min 40 s
002	20 l Heptan	Heißversuch	ohne BR-Lüfter hochgesetzte Wanne Branddauer 8 min 30 s
003	20 l Heptan	Heißversuch	mit BR-Lüfter+ 3 Lüftungsclappen hochgesetzte Wanne Branddauer 6 min 30 s
004	35 l Heptan	Löschversuch nach 5 min Vorbrennzeit	<b>gelöscht nach 10 min</b> Löscher+manuelle Schüttung
005	35 l Heptan	Löschversuch nach 5 min Vorbrennzeit	<b>gelöscht nach 12 min</b> Löscher+manuelle Schüttung

Im Versuch 1 wurden Vorgehensweise und Messanordnung getestet. Bild 3.7 zeigt ein Foto der Versuchsanordnung, im Bild 3.8 ist die Versuchsanordnung mit den Messstellen skizziert.



**Bild 3.7:** Foto der Versuchsanordnung für Versuch 001

Im Bild ist noch die Düsenverlängerung aus dem vorangegangenen Ausbringttest zu sehen. Die Brandwanne (Normbrandwanne mit 0,92 m Durchmesser und 15 cm Höhe) ist auf dem Boden einer größeren Wanne aufgestellt. Damit wurde versucht, die Ausbreitung der PyroBubbles im gesamten Brandraum zu verhindern. Im Brandversuch wird in der Überwanne Wasser zur Kühlung der Brandwanne eingelassen. Mittig über der Brandwanne sind in verschiedenen Höhen Thermolemente an einer Kette angeordnet. Zur Messung der Wärmestrahlung sind 3 Wärmeflussensoren in jeweils 1,5 m Höhe und 1,5 m Entfernung, von der Mitte der Brandwanne gemessen, installiert. Die zwei gegenüberliegenden Sensoren (Rad1 und Rad2) sind normal zur Achse der Flamme ausgerichtet, der dritte Sensor (Rad3) in einem Winkel von 45°.



**Bild 3.8:** Skizze der Versuchsanordnung mit den Messstellen für Versuch 001 (Blick von der Brandraumbür frontal auf die Brandwannen)

In diesem ersten Versuch sollte mit dem kurzen Rohr, aber im Schutz des Strahlungsschirms, das Löschmittel aufgebracht werden. Die Löschung musste abgebrochen werden, da der Löscher keinen ausreichenden Granulatstrom lieferte. Die tief liegende Anordnung der Brandwanne erwies sich zusätzlich als ungünstig, da aufgrund der eingeschränkten Luftzufuhr keine typische Poolbrandentwicklung erfolgte. Bilder der Brandentwicklung und des Löschversuchs sind in Bild 3.9 gezeigt.



1 min nach Zündung



2 min nach Zündung



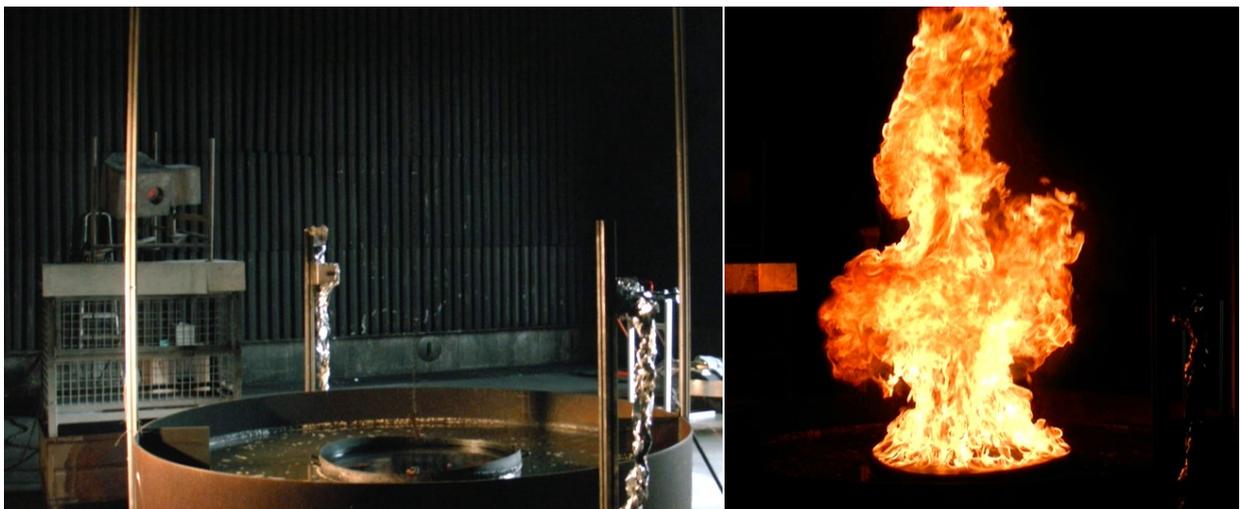
Beginn der Löschung



Abbruch wegen unzureichender  
Löschmittelförderung

**Bild 3.9:** Momentaufnahmen des Brandversuchs 001 zu verschiedenen Zeiten

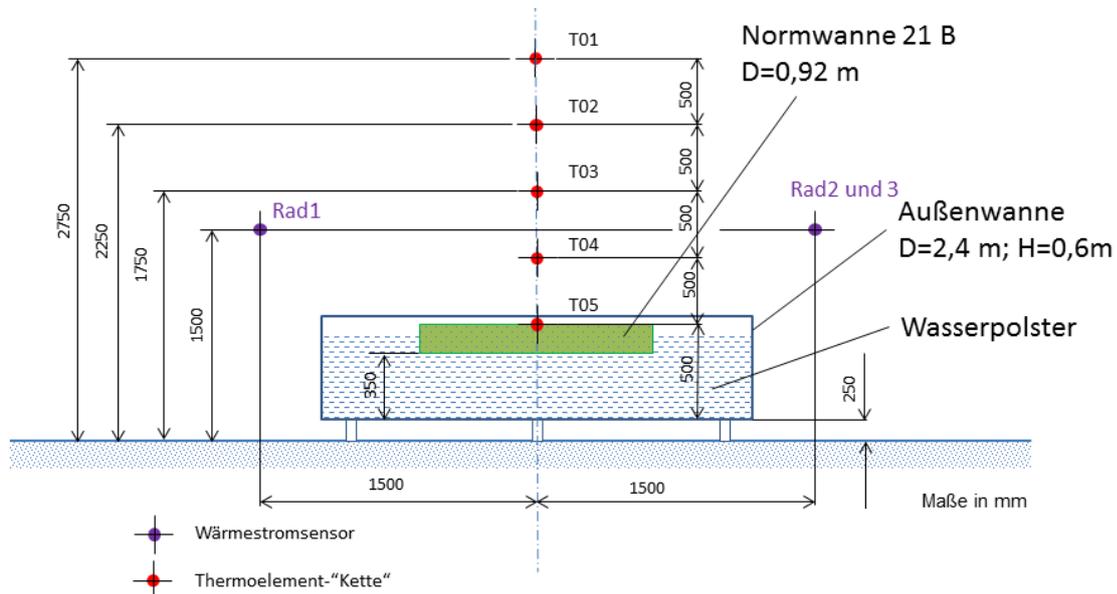
Um einen charakteristischen Poolbrand mit freier Zuströmung zu ermöglichen, wurde die Anordnung durch Hochsetzen der Brandwanne modifiziert. Im Bild 3.10 ist ein Foto des Versuchsaufbaus zu sehen sowie ein Videoschnappschuss während der Brandversuchs, der die gewünschte Poolbrandausbildung zeigt. In die Außenwanne wurde zur Kühlung der Brandwanne bis ca. 40 cm Füllstand Wasser aufgefüllt.



**Bild 3.10:** Foto des Versuchsaufbaus (links) und des Poolbrandes (Versuch 003) 2 min nach der Zündung (rechts)

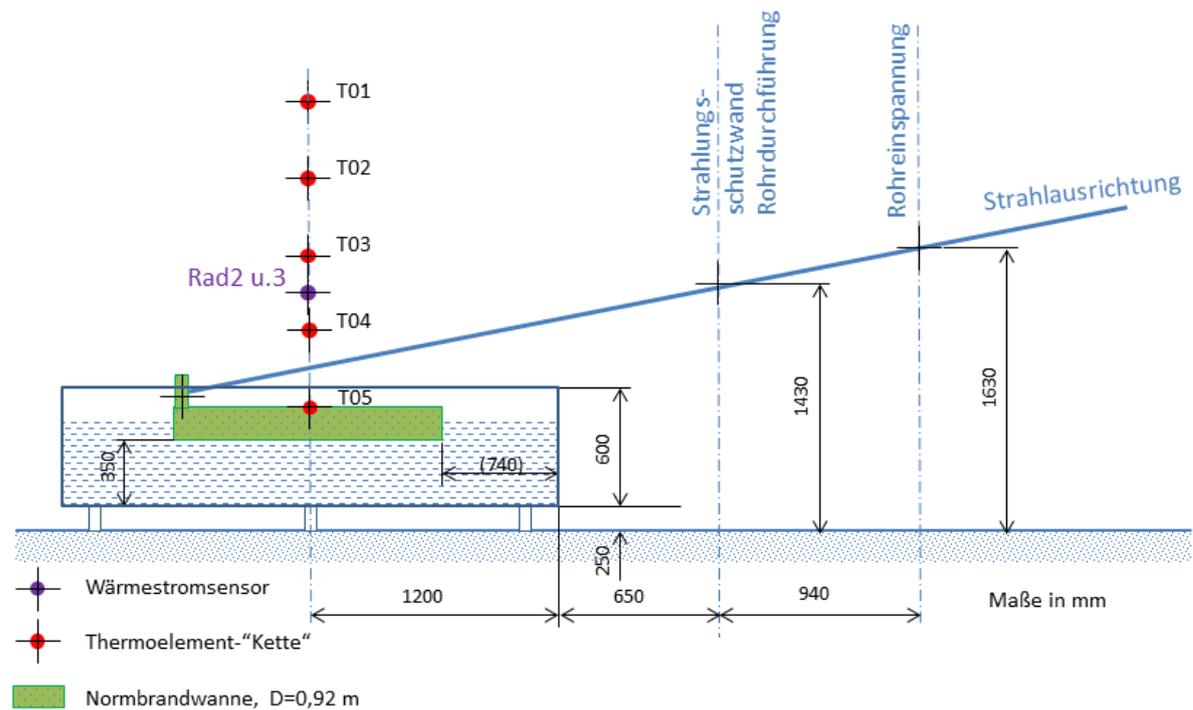
Im Bild 3.11 ist die veränderte Anordnung skizziert. In den folgenden Versuchen, den beiden Heißversuchen (002 und 003), wurde das Lüftungsregime festgelegt und die Branddauer im Heißversuch ermittelt.

Im Versuch 002, dem Versuch ohne Absaugung durch den Brandraumlüfter, wurde eine mittlere Abbrandgeschwindigkeit von 1,6 kg/min erzielt. Durch Zuschalten des Brandraumlüfters und Öffnen von 3 Zuluftklappen wurden im Versuch 003 die Zu- und Abluftbedingungen variiert, so dass sich eine mittlere Abbrandgeschwindigkeit von 2,1 kg/min einstellte.



**Bild 3.11:** Skizze der Messstellenanordnung für Versuche 002 und 003 (aus Blickrichtung der Brandraamtür)

Das Belüftungsregime vom Versuch 003 wurde für die folgenden Löschversuche 004 und 005 beibehalten. In diesen wurde mit der Löschung durch Aufbringen der PyroBubbles nach 5 min Branddauer begonnen. Ausblasversuche und Brandversuche wurden zeitlich abwechselnd durchgeführt. Im Versuch 004 kam die eingespannte Löschdüse mit Rohrverlängerung sowie einem Strahlungsschutzschirm zwischen Stativ und Löschgerät zum Einsatz. Eine Skizze zur Anordnung ist in Bild 3.12 zu sehen.



**Bild 3.12:** Skizze zur Strahlausrichtung im Versuch 004 (Ansicht von der Seite)

In der Vorbrennphase wurde nach 3 min der Brandraumlüfter eingeschaltet und nach 5 min die Ausbringung der PyroBubbles mit dem druckluftbetriebenen Löscher gestartet. Zum Zeitpunkt des Löschbeginns stand das Gerät bereits unter Druck und die Freigabe des Löschmittels erfolgte mit Umlegen des Kugelhahns.

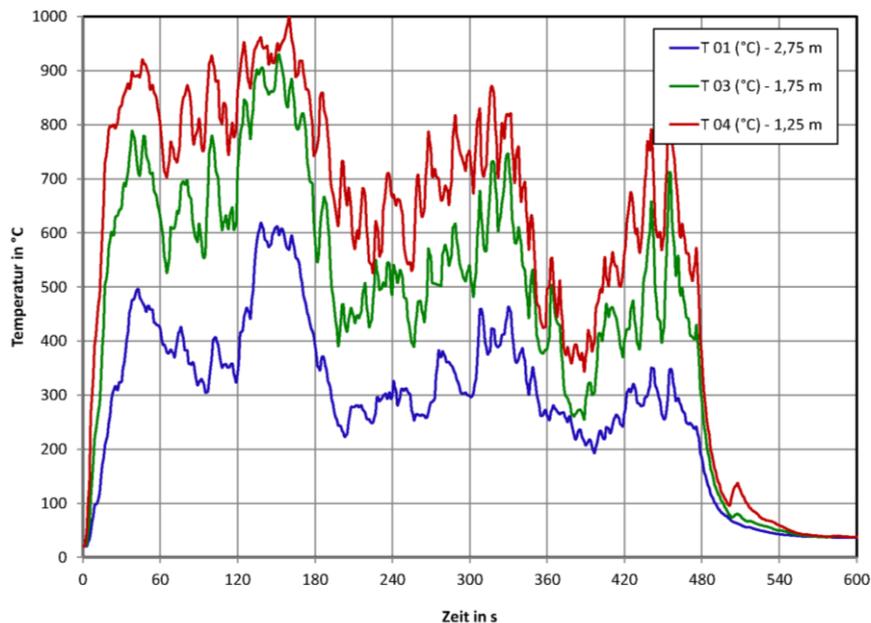
Bereits die Vorbrennphase zeigte einen sehr turbulenten Flammenbrand, dessen Brandfläche zeitweise die gesamte Grundfläche der Außenwanne erfasste. Mit Start der Löschmittelaus bzw. -aufbringung erfolgte eine starke Intensivierung der Flamme, da es infolge der Freigabe des PyroBubblestrahles zu einer verstärkten Luftzuführung kam. Diese ist im Bild 3.13 dargestellt. Die Freisetzung des Löschmittels erfolgte über die Dauer von fast 2 Minuten, d. h. mit einem durchschnittlichen Förderstrom von 25 l/min.



**Bild 3.13:** Videoschnappschuss des Flammenbrandes mit Beginn der Löschmittelfreigabe (Druckstoß) im Versuch 004

In den Bildern A1 bis A3 im Anhang ist eine Abfolge von Videoschnappschüssen zur Dokumentation des Brand- und Löschverlaufes dargestellt.

Der Brandverlauf setzt sich während der Löschmitteleinbringung mittels PyroBubblelöcher fast unbeeinflusst fort. Das zeigen auch die Temperaturverläufe im Bild 3.14 an den mittig über der Brandwanne installierten Messstellen sowie die Wärmestromdichten an den Strahlungssensoren (vgl. Bild 3.15).

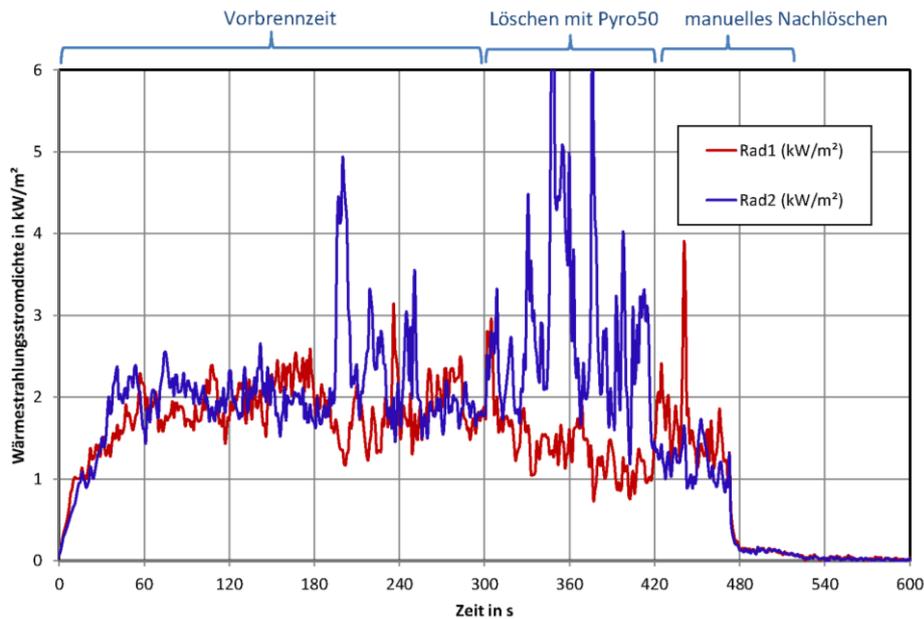


**Bild 3.14:** Temperaturen über der Brandwanne im Versuch 004

In den folgenden 2 Minuten wurden weitere 50 l PyroBubbles, die vor dem Versuch bereitgestellt wurden, nacheinander in 5 Schüttvorgängen auf die Brandfläche gebracht, um auch die nicht bzw. wenig bedeckten Bereiche zu füllen. Das Aufbringen des Löschmittels war bei dem intensiven Flammenbrand nicht einfach (schlechte Sicht und hohe Wärmestrahlungsbelastung). Erst nachdem mit den PyroBubbles aus den ersten beiden Schüttvorgängen der Brand etwas eingedämmt wurde, konnten die restlichen Schüttungen gezielt aufgebracht werden.

Das Diagramm mit dem Verlauf der Wärmestromdichte im Bild 3.15 zeigt diese Brandbeeinflussung mit dem Rückgang der Wärmestrahlung nach ca. 8 min.

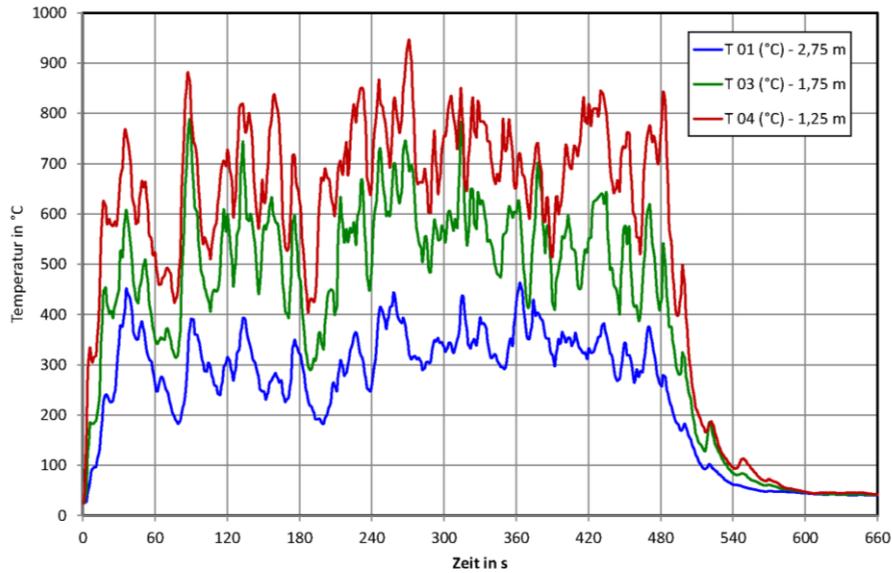
Unter Verwendung eines Rechens, mit dem die aufgeschütteten PyroBubbles gleichmäßig über die Wannenfläche verteilt wurden, war der Brand nach 10 min vollständig gelöscht.



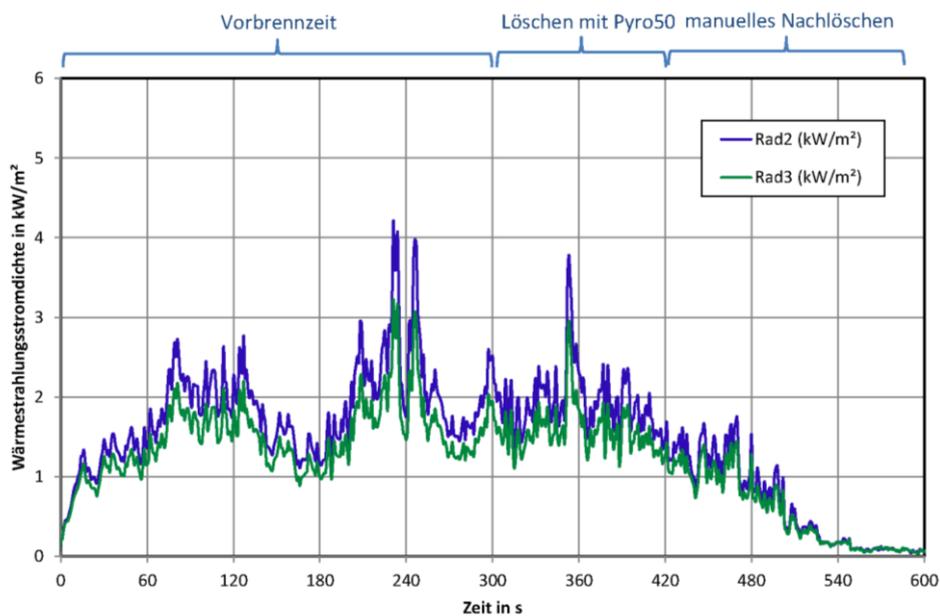
**Bild 3.15:** Wärmestrahlung im Versuch 004

Der Versuch 005 ist der Wiederholungsversuch und wurde mit gleicher Versuchsanordnung und unter gleichen Bedingungen durchgeführt. Es bestätigten sich die Erfahrungen und Ergebnisse des Versuchs 004.

Die Löschmittelaufbringung mit dem PyroBubblelöschler verlief nicht zufriedenstellend. Die Menge an PyroBubbles wurde zwar restlos gefördert, aber die Ausbringzeit erstreckte sich bei diskontinuierlicher Förderrate über mehr als 2 Minuten und war mit einer immensen Staubentwicklung verbunden (Abrieb der PyroBubbles). Bei fester Einspannung der Löschdüse mit Rohrverlängerung wurde eine nur einseitige Befüllung der Brandwanne erzielt. Erst nach Aufschüttung weiterer PyroBubbles auf die noch nicht ausreichend bedeckten Bereiche und manueller Glättung der PyroBubbleschicht wurde mit der Menge von ca. 70 l PyroBubbles nach 3 min eine Reduzierung der Brandleistung erzielt, gemessen an den Temperaturen über der Brandwanne und dem Wärmestrahlungsintensität in 1,5 m Entfernung. Die Aufschüttung weiterer 30 l PyroBubbles und Verteilung auf der Oberfläche führte dann zur Verlöschung aller Flammen. Im Versuch 005 wurde die vollständige Löschung nach ca. 12 min erzielt, wobei bereits nach 10 min nur noch kleine Flammen sichtbar waren.



**Bild 3.16:** Temperaturen über der Brandwanne im Versuch 005



**Bild 3.17:** Wärmestrahlung an den Sensoren Rad2 und Rad3 im Versuch 005

Die Chronologie des Brand- und Löschversuchs 005 ist durch die Abfolge der Videoschnappschüsse im Bild 3.18 skizziert.

04:47		Zündung
9:04		Vorbrennphase
9:46		Druckstoß bei Freigabe des Löschmittels
10:40		Brand während der Löschmittelaufbringung mit dem PyroBubblelöscher Löschmittelförderung dauerte fast 2,5 min
12:46		Aufschütten vom Eimer 1

**Bild 3.18:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 005 (Teil 1)

13:04		Strahlungsreduzierung
13:19		Nach Aufschütten vom Eimer 2
13:58		Eimer 3
15:45		Eimer 4
16:12		gelöscht

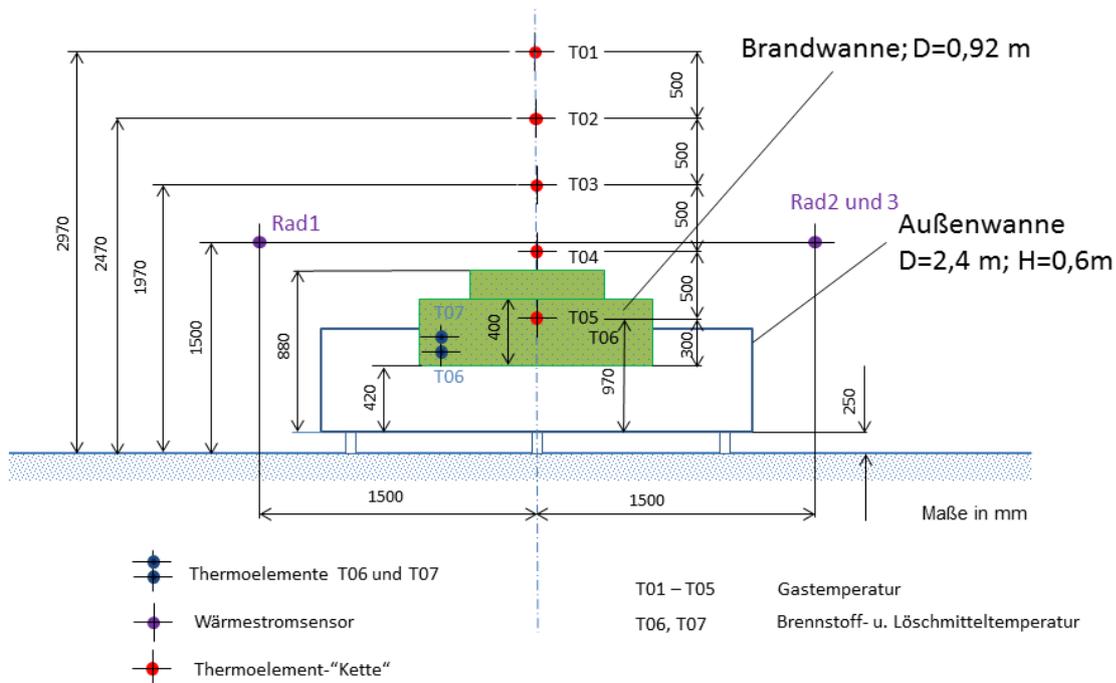
**Bild 3.18:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 005 (Teil 2)

Für die weiteren Versuche wurden zwei PyroBubblelöcher eingesetzt, die einen kontinuierlichen Förderstrom von jeweils 50 l/min lieferten (vgl. Abschnitt Ausblasversuche). Tabelle 3.2 zeigt die Übersicht zu den weiteren Versuchen

**Tabelle 3.2:** Brand- und Löschversuche mit Versuchsanordnung 2 (2 Löscher)

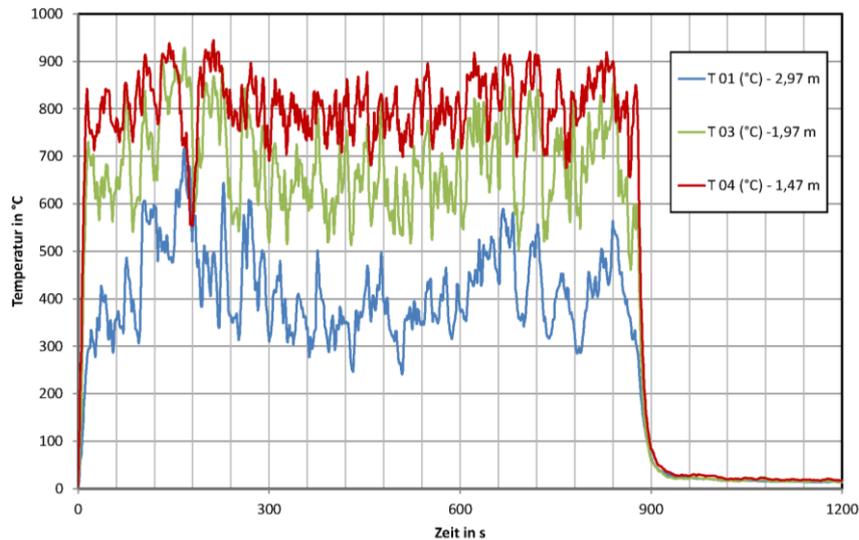
Versuch Nr.	Brennstoff	Art des Versuchs	Bemerkung
006	40 l Heptan	Heißversuch	Wasserpolster in Brandwanne
007	40 l Heptan	Heißversuch	Wasserkühlung in Außenwanne
008	40 l Heptan	Löschversuch nach 5 min Vorbrennzeit	2 Löscher (stationär + mobil) <b>nicht gelöscht</b>
009	40 l Heptan	Löschversuch nach 5 min Vorbrennzeit	2 Löscher (stationär + mobil) Wasserkühlung in Außenwanne <b>nicht gelöscht</b>

Als Brandwanne wurde eine Wanne mit dem Durchmesser von 92 cm, aber einer größeren Höhe als die Normbrandwanne, verwendet. Mit 35 cm Höhe bietet diese Wanne die Möglichkeit, Wasserpolster, Flüssigbrennstoff für längere Branddauern und PyroBubbleschichten von 10 bis 15 cm Höhe aufzunehmen und so auch die Löschwirkung einer auf der Flüssigkeitsoberfläche schwimmenden Granulatschicht untersuchen zu können, ähnlich wie bei den Laborversuchen zur Verdunstungsintensität. Aufgrund der geänderten Höhen wurde die Messstellenanordnung für die Temperaturen über der Brandwanne angepasst, dargestellt in der Skizze im Bild 3.19.

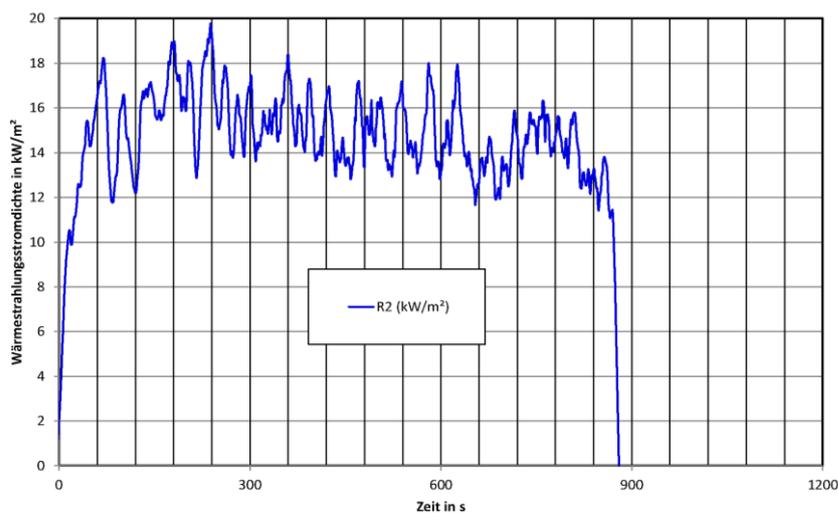


**Bild 3.19:** Skizze der Versuchs- und Messstellenanordnung für Versuche 006 bis 009

Im Heißversuch 006 wurde die Branddauer ermittelt sowie Temperaturen und Wärmestrahlung gemessen. Bei einer Branddauer von 14 min 40 s betrug die mittlere Abbrandrate 1,9 kg/min. Die Temperaturen über der Brandwanne in ca. 2 und 3 m Höhe sowie in Höhe des Wärmestrahlungssensors zeigt Bild 3.20. Die am Sensor Rad 2 gemessenen Werte der Wärmestrahlungsstromdichte sind in Bild 3.21 dargestellt.



**Bild 3.20:** Temperaturen (T01, T03, T04) über der Brandwanne im Versuch 006



**Bild 3.21:** Wärmestrahlungsstromdichte in 1,5 m Entfernung (Rad2) im Versuch 006

Der Versuch 008 stellt die Wiederholung des Versuchs 006 unter Löschmittelbeaufschlagung dar. In dem Löschversuch sollte der Heptanbrand nach einer Vorbrennzeit von 5 min durch Aufbringung von 100 l PyroBubbles auf die Brandwanne gelöscht werden. Dazu wurden 2 PyroBubblelöcher verwendet, wobei für einen Löscher die stationäre Variante mit Einspannung und Rohrverlängerung beibehalten wurde. Mit dem zweiten mobilen Löscher sollte von der gegenüberliegenden Seite aus die Aufschüttung der nicht bedeckten Bereiche vorgenommen werden.

Der Versuchsablauf ist durch die Abfolge verschiedener Momentaufnahmen im Bild 3.22 dokumentiert.

02:20



Zündung

7:17



Zeitpunkt des Austritts des  
Löschmittelstroms aus der  
Düse

7:18



Druckstoß beim Auftreffen  
vom Löschmittelstrahl auf  
den Flammenbrand nur  
einen Bruchteil einer  
Sekunde später

8:13



Löschmittelausbringung mit  
stationärem Löscher endet

8:18



Löschmittel aus stationärem  
Löscher nach 1 min  
aufgebraucht,  
Beginn der Löschmittel-  
ausbringung mit mobilem  
Löscher von der  
gegenüberliegenden Seite

**Bild 3.22:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 008 (Teil 1)

08:26		Während der Löschphase mit mobiler Technik
8:27		Während der Löschphase mit mobiler Technik
8:31		Positionswechsel während der Löschphase mit mobiler Technik
9:11		Löschmittelausbringung mit stationärem Löscher
9:27		Löschmittel aufgebraucht

**Bild 3.22:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 008 (Teil 2)

10:20		Brand (8 min) nach Löschmittelaufbringung
12:20		Brand (10 min) nach Löschmittelaufbringung
14:20		Brand (12 min) nach Löschmittelaufbringung
nach ca. 20 min		Keine gleichmäßige Verteilung der PyroBubbles, dort, wo keine Bedeckung erzielt wird, dauert die Verbrennung an.

**Bild 3.22:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 008 (Teil 3)

Im Versuch 008 konnte keine Löschung erzielt werden. Nach 5 min Branddauer wurde begonnen, das Löschmittel aus dem ortsfesten Löscher auf die Brandwanne aufzubringen. Mit Freigabe des Löschmittelstroms und Einströmung in den Verbrennungsbereich erfolgt eine Intensivierung des Brandes, die gut erkennbar ist, wenn man die beiden kurz

hintereinander aufgenommenen Bilder der normalen Brandentwicklung (Zeitpunkt 7:17) mit der zum Zeitpunkt 7:18 vergleicht.

Die Löschmittelaufbringung aus dem stationären Löscher gelang innerhalb von einer Minute, ohne dass eine ersichtliche Brandbeeinflussung stattfand. Unmittelbar danach wurde von der entgegengesetzten Seite aus mit der mobilen Löschung mit kurzer Löschdüse begonnen.

Auch dort erfolgte mit Beginn der Löschmittelaufbringung eine plötzliche kurzzeitige Intensivierung des Flammenbrandes (Bild 3.22 zum Zeitpunkt 8:18), vermutlich infolge der zusätzlichen Luftzufuhr durch den Pressluft-Löschmittel-Strahl. Das geschieht bei jedem Schließen und Öffnen des Kugelhahns an der Düse, was bei Positionswechsel der Einsatzkraft in den meisten Fällen erforderlich ist.

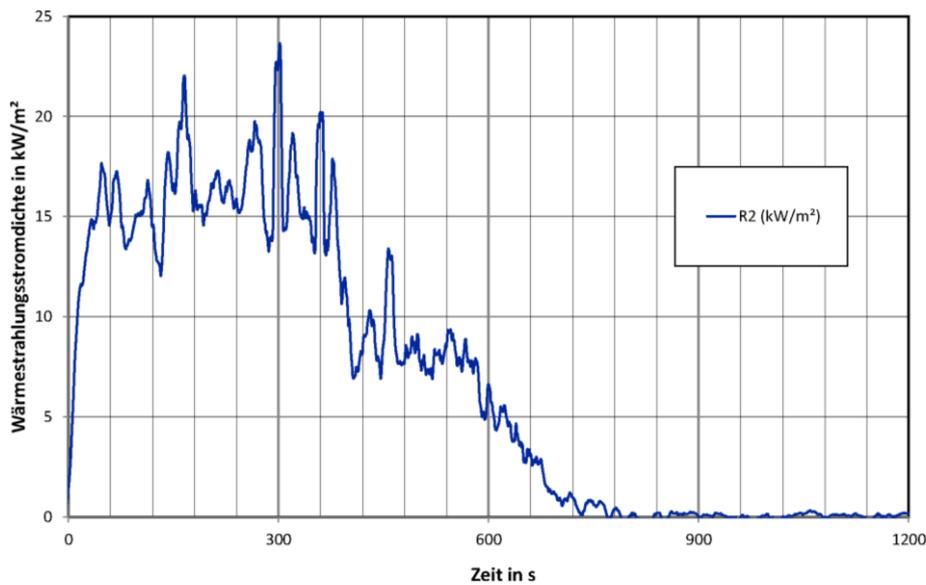
Die Intensivierung der Verbrennung erhöhte die Strahlungsbelastung der Einsatzkräfte, so dass der Löschangriff behindert wurde.

Nach ca. 1 Minute ist die mobile Löschmittelaufbringung beendet. Der Brand hat nicht an Intensität verloren, wie im Bild 3.22 nach ca. 7 min Branddauer (Zeitpunkt 9:27) zu sehen ist. Der Brand dauert mit langsam abnehmender Intensität weiter an. Ein völliges Verlöschen einzelner Flammen erfolgt erst nach ca. 25 min.

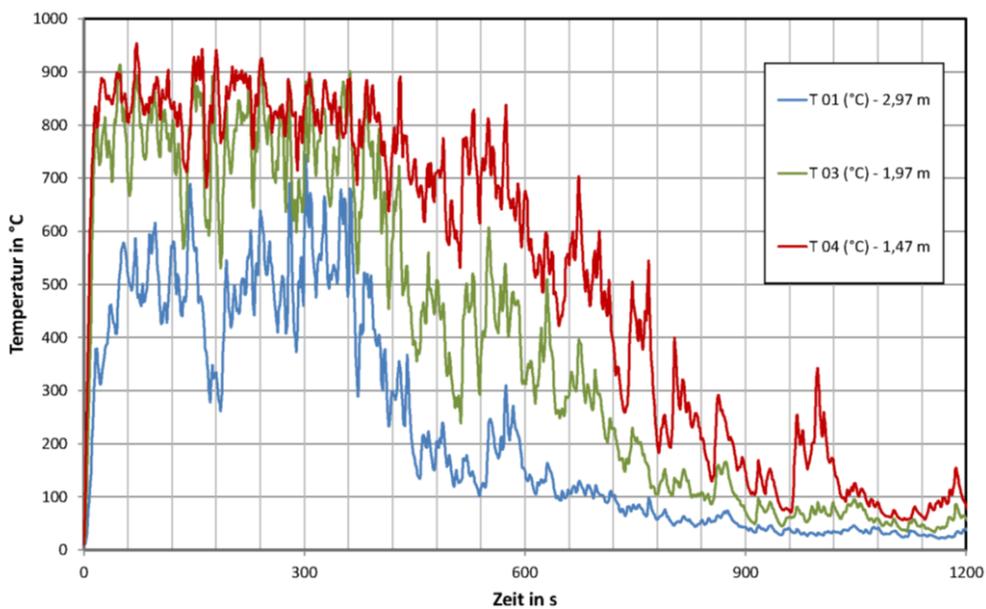
Die PyroBubbleschicht ist asymmetrisch über die Brandfläche verteilt, wie aus dem letzten Foto des Bildes 3.22 zu entnehmen ist.

Der stationäre Löscher erzeugt eine halbkegelförmige Aufschüttung, so dass die Schicht der PyroBubbles auf der Brandflüssigkeit unterschiedliche Stärke aufwies. Durch Einsatz des mobilen Löschers konnte das trotz größter Anstrengung nicht ausgeglichen werden. Dadurch wurde die zur Löschung notwendige Schichthöhe in einigen Bereichen nicht erreicht, so dass dort die Löschung nicht erfolgte und die Flammen über der Schicht weiterbrannten. Ein komplettes Verlöschen kann dann mit manuellem Ausgleichen der PyroBubbleschicht mittels Schaufel oder anderem Gerät erreicht werden.

Die gemessenen Wärmestrahlungsströme und Temperaturverläufe an den Messstellen über der Brandwanne, dargestellt in den Bildern 3.23 und 3.24, zeigen, obwohl keine Brandlöschung stattfand, eine Brandbeeinflussung.



**Bild 3.23:** Wärmestrahlungsstromdichte in 1,5 m Entfernung (Rad2) im Versuch 008



**Bild 3.24:** Temperaturen (T01, T03, T04) über der Brandwanne im Versuch 008

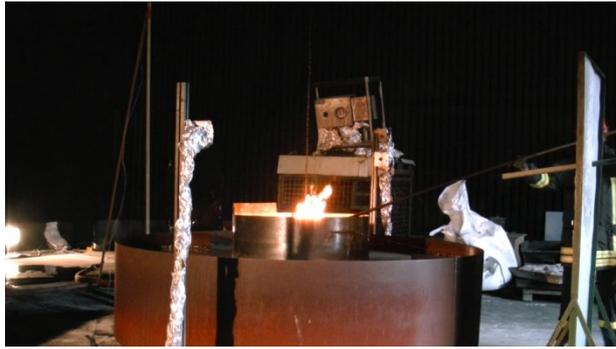
Versuch 007 ist ein Heißversuch, in dem die Außenwanne zur Kühlung der Brandwanne mit Wasser gefüllt wurde. Die Branddauer betrug 16,5 min. Das entspricht einer mittleren Abbrandrate von 1,7 kg/min und war damit etwas kleiner als im Heißversuch ohne Kühlung der Brandwanne. Die Verläufe der Temperaturen und des Wärmestrahlungsstroms wurden aufgezeichnet. Sie zeigen gleiches Verhalten wie bei dem Heißversuch 006 und sind hier nicht nochmals dargestellt.

Die Wiederholung des Heißversuchs 007 mit Löschmittelbeaufschlagung wurde mit Versuch 009 vorgenommen. Auch in diesem wurde die Außenwanne mit Wasser gefüllt, so dass die Brandwanne bis zur Höhe von 6 cm im Wasser stand.

Nach einer Verbrennzeit von 5 min wurden 50 l PyroBubbles mittels stationärem PyroBubblelöscher über eine Dauer von 60 s ausgebracht. Anschließend wurde die Beaufschlagung der Wanne mit Löschmittel aus dem mobilen PyroBubblelöscher fortgesetzt. In dieser zweiten Löschphase wurde der Löschmittelstrahl, wie schon beim Versuch 008, erst von der gegenüberliegenden Seite aus und dann im Winkel von 90° in die Brandwanne gerichtet, um eine gleichmäßige Verteilung zu erzielen. Nach ca. 75 s mit kurzer Unterbrechung der Löschmittelförderung war das Löschmittel aufgebraucht, ohne dass eine Löschung stattfand. Der Blick in die Brandwanne bei abklingendem Brand zeigt auch hier die nicht gleichmäßige Verteilung der PyroBubbles auf der Brandfläche. An den nicht ausreichend bedeckten Stellen brennt es sehr lange weiter.

Im nachfolgenden Bild 3.25 ist der Ablauf des Versuches anhand von Momentaufnahmen dargestellt. Auch in diesem Versuch zeigt sich die durch den Druckluftlöscher verursachte Intensivierung der Verbrennung bei jedem Öffnen der Löschmitteldüse, die den mobilen Einsatz erschwert.

1:23



Zündung

5:23



Brand nach 4 min

6:24



Löschbeginn mit  
ortsfestem Löscher

6:25



Intensivierung des  
Flammenbrandes  
nur 0,5 s später

6:53



Brand während der  
Löschung mit  
stationärem  
Löscher

**Bild 3.25:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 009 (Teil 1)

7:16		Brand zum Ende der ersten Löschphase
7:34		Ende der ersten Löschphase  (Rohr ist noch nicht drucklos),  Beginn mobiler Löschung
7:49		Brand während mobiler Löschphase  Löschmittel- ausbringung über 15 s
8:04		Brand während mobiler Löschphase  Löschmittel- ausbringung über 30 s
8:13		Druckstoß bei erneuter Freigabe des Löschmittels nach Positionswechsel

**Bild 3.25:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 009 (Teil 2)

8:38



Ende mobiler  
Löschung,  
Löschmittel  
aufgebraucht

9:23



Brand (8 min) nach  
Löschung

11:23



Brand (10 min) nach  
Löschung

13:23



Brand (12 min) nach  
Löschung

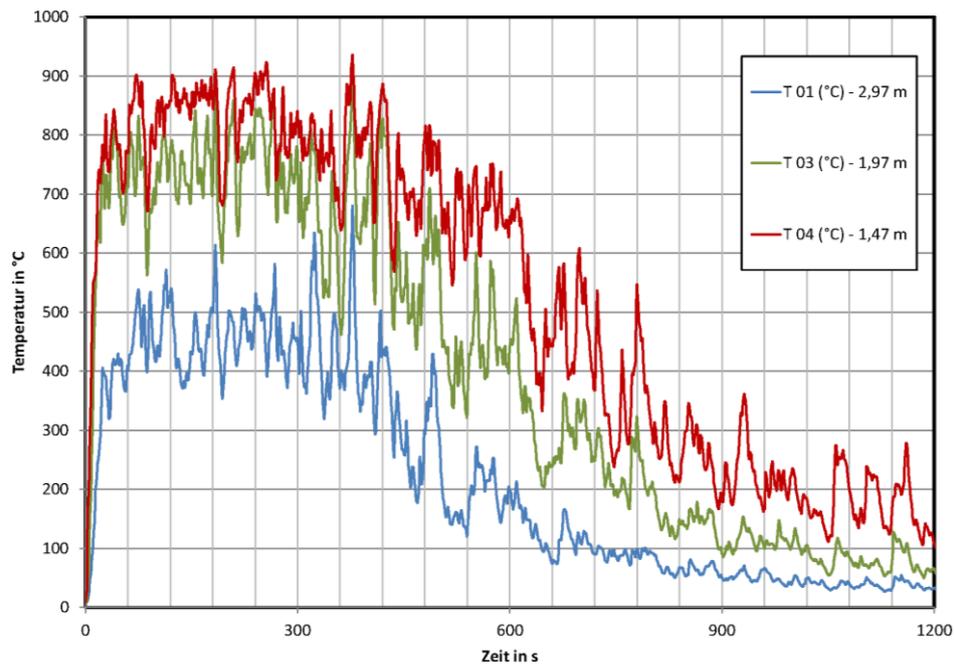


Brandwanne  
40 min nach  
Brandbeginn

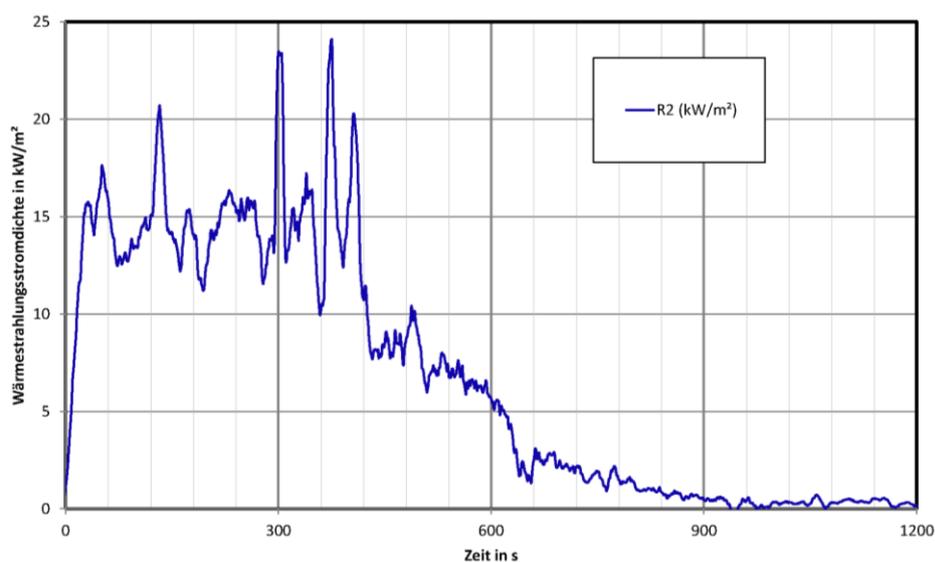
**Bild 3.25:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 009 (Teil 3)

Das nicht von PyroBubbles ausreichend bedeckte mit Heptan getränkte Granulat brennt bis zu einer Stunde nach Versuchsbeginn mit kleiner Flamme weiter. Im letzten Foto der Bildfolge zum Versuch 009 ist der Ort des Flammenbrandes erkennbar. Das ist der am wenigsten mit Granulat bedeckte Bereich. Vom mobilen Löscher wäre er nur von der nicht im Versuch erreichten Seite aus zu treffen gewesen.

Die gemessenen Werte des Wärmestrahlungsstroms sowie die Temperaturen über der Brandwanne sind in Diagrammen in Bild 3.26 und 3.27 dargestellt.



**Bild 3.26:** Temperaturen (T01, T03, T04) über der Brandwanne im Versuch 009



**Bild 3.27:** Wärmestrahlungsstromdichte in 1,5 m Entfernung (Rad2) im Versuch 009

### 3.3 Zusammenfassung der Versuche im Technikumsmaßstab

Das Löschmittel PyroBubble ist nach Zulassungstests der MPA Dresden ein für Flüssigkeitsbrände bis zu einer Größe des Brandobjekts 113 B geprüft und zugelassenes Löschmittel.

Einsatzfähige mobile Löschtechnik für die Löschung mit PyroBubbles stand anfangs nicht zur Verfügung. Später konnte ein fahrbarer Sonderlöscher zum Ausbringen von PyroBubbles, der auf einem Pulverlöscher PG50 basierte, eingesetzt werden.

Zur Einschätzung der Eignung der PyroBubbles zur mobilen Löschung wurden Löschversuche von Flüssigkeitsbränden analog zu den Versuchen nach EN 3 Blatt 7 durchgeführt.

Im ersten Versuchsabschnitt wurde sich auf die Erreichung einer gleichmäßigen Schichtdicke bei maximal möglicher Entfernung zum Brandobjekt ohne Brandeinfluss konzentriert.

Es wurde festgestellt, dass:

- im mobilen Einsatz eine gut handhabbare kurze Düse notwendig ist,
- die zum Löschen als notwendig erachtete Löschmittelhöhe den Einsatz von 2 Löschern für ein Brandobjekt 21 B erfordert und
- das Ausbringen der PyroBubbles mit einer starken Staubentwicklung verbunden ist, so dass entsprechender Atemschutz erforderlich ist.

In einem zweiten Versuchsabschnitt wurden Löschversuche mit zwei in der Höhe unterschiedlichen Wannen durchgeführt. Die Fläche der Brandwanne entsprach der Fläche des Brandobjektes 21 B nach DIN EN 3 Blatt 7.

Heptanversuchsbrände in einer Brandwanne mit einer Höhe von 15 cm konnten mit einem Löscher nicht gelöscht werden. Durch zusätzliches manuelles Aufbringen konnte die notwendige Schichtdicke zur Löschung erreicht werden.

Heptanversuchsbrände in einer Brandwanne mit einer Höhe von 35 cm konnten mit zwei Löschern, von denen einer mobil eingesetzt wurde, nicht gelöscht werden.

Mit dem Öffnen der Löschdüse wird durch den PyroBubblepartikelstrom zusätzliche Luft in die Flamme eingebracht. Dies führte zur Erhöhung der Verbrennungsintensität. Der Vorgang trat bei jedem Öffnungsvorgang auf.

## 4 Zusammenfassung

Im Forschungsvorhaben wurden Feststofflöschmittel in Form von Glasgranulaten bzw. -kugeln und gegebenenfalls zusätzlichen Bindemitteln untersucht. Diese Löschmittel sollen als Diffusionssperren für die Brennstoffdämpfe dienen und somit die Löschung herbeiführen. Um das einzuschätzen, wurden Versuche im Labor- und Technikumsmaßstab durchgeführt.

Die Ergebnisse der Laborversuche sind:

Mit kleiner werdendem Durchmesser der Partikel steigt die Verdunstungsrate.

Die niedrigste Verdunstungsrate wird mit einem Granulat mit Bindemittel erreicht. Dies ist den spezifischen Eigenschaften des Granulats und des Binders geschuldet.

Es konnte unter den gewählten Bedingungen des Brandtests im Labor nur mit diesem Löschmittel die Löschung erreicht werden.

Die Handhabung der Löschmittel ist mit einer Staubentwicklung verbunden und erfordert entsprechende Arbeitsschutzmaßnahmen.

Nach der Bedeckung der brennbaren Flüssigkeiten mit den getesteten Löschmitteln werden diese mit Flüssigkeit durchsetzt. Diese haften an den Löschmitteln, die dann umweltgerecht zu entsorgen sind.

In den Technikumsversuchen wurde nur ein Löschmittel untersucht, da nur hierfür Auswurftechnik zur Verfügung stand.

Dieses Löschmittel besitzt nach durchgeführten Zulassungstests der MPA Dresden die Zulassung für Flüssigkeitsbrände bis zu einer Größe des Brandobjekts 113 B.

Zur Einschätzung der Eignung der PyroBubbles zur mobilen Löschung wurden Löschversuche von Flüssigkeitsbränden analog zu den Versuchen nach EN 3 Blatt 7 durchgeführt.

Die eingesetzte mobile Löschtechnik für die Löschung mit PyroBubbles basierte auf einem modifizierten Pulverlöscher PB50.

In Ausbringversuchen wurde sich auf die gleichmäßige Aufbringung des Löschmittels auf die Flüssigkeit und die Erreichung der Schichtdicke von 10 cm konzentriert.

Es wurde außerdem festgestellt, dass:

- im mobilen Einsatz eine gut handhabbare kurze Düse notwendig ist,
- die zum Löschen als notwendig erachtete Löschmittelhöhe den Einsatz von 2 Löschern für ein Brandobjekt 21 B erfordert und
- das Ausbringen der PyroBubbles mit einer starken Staubentwicklung verbunden ist, so dass entsprechender Atemschutz erforderlich ist.

Es wurden Löschversuchen mit einem Brandobjekt 21 B nach DIN EN 3 Blatt 7 durchgeführt. Heptanversuchsbrände in einer Brandwanne mit einer Höhe von 15 cm konnten mit einem Löscher nicht gelöscht werden. Durch zusätzliches manuelles Aufbringen konnte die notwendige Schichtdicke zur Löschung erreicht werden.

Heptanversuchsbrände in einer Brandwanne mit einer Höhe von 35 cm konnten mit zwei Löschern, von denen einer mobil eingesetzt wurde, nicht gelöscht werden.

Mit dem Öffnen der Löschdüse wird durch den Partikellöschmittelstrom zusätzliche Luft in die Flamme eingebracht. Dies führte zur Erhöhung der Verbrennungsintensität. Der Vorgang trat bei jedem Öffnungsvorgang der Löschdüse auf.

## **5 Schlussfolgerungen**

Die untersuchten Löschmittelgranulate für die Brandbekämpfung bei Flüssigkeitsbränden führten nur in einem einzigen Fall im Labormaßstab zum Erfolg.

Mobile, leistungsfähige Löschtechnik für die Brandbekämpfung steht nicht zur Verfügung. Die getestete Technik führt zur kurzfristigen Intensivierung des Brandes und gestattet nicht die Aufbringung des Löschmittels mit erforderlicher Schichtdicke.

Um die Eignung der Löschmittel besser einschätzen zu können, sind weitere Untersuchungen, insbesondere die Entwicklung entsprechender Ausbringtechnik, erforderlich.

Der Einsatz mit mobiler Technik ist zum gegenwärtigen Zeitpunkt für Flüssigkeitsbrände nicht zu empfehlen.

Die umweltgerechte Entsorgung der Glaspartikel ist zu gewährleisten.

## Literatur

[GEN 2011]

*PyroBubbles\_Prospekt\_de.pdf*, Informationsprospekt, ©Genius Entwicklungsgesellschaft mbH, 12.10.2011

[GEN 2019]

Homepage Genius Group, Produktinformationen: <https://www.genius-group.de/produkte/pyrobubbles/>

[MPA 2012]

MPA Dresden GmbH, Amtlich anerkannte Prüfstelle für Feuerlöschmittel und -geräte, Fuchsmühlenweg 6F, 09599 Freiberg, Untersuchungsbericht Nr. 2012-F-4045, September 2012

[NEB 2019]

NebufightEN.pdf, Download 2019 von [www.kremer-it/documents/NebufightEN.pdf](http://www.kremer-it/documents/NebufightEN.pdf)

[PAT 2019]

<https://patents.google.com/patent/DE102016011955A1/de>

[Pressel 2011]

Hendrik Pressel: Experimentelle Untersuchung des Auftriebsverhaltens für das Löschmittel PyroBubbles in unterschiedlichen flüssigen Medien in Abhängigkeit von der Schichtdicke, Bachelorarbeit, OvG Universität Magdeburg, Fakultät für Verfahrens- und Systemtechnik und HS Magdeburg/Stendal, Fachbereich Bauwesen, 2011

[PS HGK 2019]

3M<sup>TM</sup>Glass Bubbles, Glashohlkugeln, Produktinformation und Spezifikation, Download *td\_de\_210125.pdf* vom Juni 2019, <https://docplayer.org/66935291-3m-deutschland-gmbh-advanced-materials-division-3m-glass-bubbles.html>

[Ressource Protection International 2014]

Vapor and Fire control testing of foamglas®PSF system (Gen1) on LNG and LPG, Fire report 2014, Ressource Protection International, Walker House, Georg Street Aylesbury, Bucks, HP20 2HU, United Kingdom, [www.wesprotint.co.uk](http://www.wesprotint.co.uk)

[Suarden et al. 2011]

Suarden, J. A.: Qi, R. R. Cormer, B. R.: Rana, M. , Zhang, Y., Mannam, M. S.: Application of Fire Suppression Materials on Suppression of LNG Pool Fires, Journal of Loss Prevention in the Process Industries 24 (2011) 63-75

## Anhang A

<b>Tabelle A1.1</b>	Ergebnisse der Siebanalyse der Gemischproben von PyroBubbles – Ermittelte Massen und Volumen der Siebfractionen	A1
<b>Tabelle A1.2</b>	Ergebnisse der Siebanalyse der NEBUFIGHT Granulatproben – Ermittelte Massen und Volumen der Siebfractionen	A2
<b>Tabelle A1.3</b>	Ergebnisse der Siebanalyse von NEBUFIGHT Granulat und PyroBubbles – Volumenanteile der Siebfractionen am Gesamtgemisch	A3
<b>Bilder A1 bis A3</b>	Chronologie des Brand- und Löschversuchs 004 (Teil 1-3)	A4-A6



**Tabelle A1.1:** Ergebnisse der Siebanalyse der Gemischproben von Pyrobubbles – Ermittelte Massen und Volumen der Siebfractionen

Nr.	Gesamt- masse der Probe in g	Volumen der Probe in ml	Schütt- dichte der Probe in g/l	Sieb 3,15 mm			Sieb 2 mm			Sieb 1 mm			Rest		
				$m_{S3,15}$ in g	$V_{S3,15}$ in ml	$\rho_{S3,15}$ in g/ml	$m_{S2}$ in g	$V_{S2}$ in ml	$\rho_{S2}$ in g/ml	$m_{S1}$ in g	$V_{S1}$ in ml	$\rho_1$ in g/ml	$m_{S<1}$ in g	$V_{S<1}$ in ml	$\rho_{S<1}$ in g/ml
Pyro1	475,38	2041	0,238	33,23	162	0,205	181,48	790	0,23	237,43	1000	0,237	23,24	89	0,261
Pyro2	465,13	1982	0,235	37,55	175	0,215	187,53	820	0,229	220,63	915	0,241	19,42	72	0,27
Pyro3	470,67	1995	0,236	37,61	180	0,209	184,69	815	0,227	227,07	920	0,247	21,3	80	0,266
Pyro4	100	400	0,25	12,12	59	0,205	21,87	89	0,246	62,72	240	0,261	3,24	11	0,295

$m_{S3,15}$ ;  $m_{S2}$ ;  $m_{S1}$ ;  $m_{S<1}$  - Masse der Siebfraction 3,15 mm; 2 mm; 1 mm und <1 mm(Rest)

$V_{S3,15}$ ;  $V_{S2}$ ;  $V_{S1}$ ;  $V_{S<1}$  - Volumen der Siebfraction 3,15 mm; 2 mm; 1 mm und <1 mm(Rest)

$\rho_{S3,15}$ ;  $\rho_{S2}$ ;  $\rho_{S1}$ ;  $\rho_{S<1}$  - Schüttdichte der Siebfraction 3,15 mm; 2 mm; 1 mm und <1 mm(Rest)

**Tabelle A1.2:** Ergebnisse der Siebanalyse der NEBUFIGHT Granulatproben – Ermittelte Massen und Volumen der Siebfraktionen

Nr.	Gesamtmasse der Probe in g	Volumen der Probe in ml	Schüttdichte der Probe in g/l	Sieb 3,15 mm			Sieb 2 mm			Sieb 1 mm			Rest		
				$m_{S3,15}$ in g	$V_{S3,15}$ in ml	$\rho_{S3,15}$ in g/ml	$m_{S2}$ in g	$V_{S2}$ in ml	$\rho_{S2}$ in g/ml	$m_{S1}$ in g	$V_{S1}$ in ml	$\rho_{S1}$ in g/ml	$m_{S<1}$ in g	$V_{S<1}$ in ml	$\rho_{S<1}$ in g/ml
NEBU 1-2mm	529,96	1949	0,272	-	-	-	18,57	75	0,248	455,37	1700	0,268	55,84	174	0,321
NEBU 2-4mm	404,99	2011,5	0,201	73,27	370	0,198	307,18	1550	0,198	21,31	86	0,248	3,23	5,5	0,587

$m_{S3,15}$ ;  $m_{S2}$ ;  $m_{S1}$ ;  $m_{S<1}$  - Masse der Siebfraktion 3,15 mm; 2 mm; 1 mm und <1 mm(Rest)

$V_{S3,15}$ ;  $V_{S2}$ ;  $V_{S1}$ ;  $V_{S<1}$  - Volumen der Siebfraktion 3,15 mm; 2 mm; 1 mm und <1 mm(Rest)

$\rho_{S3,15}$ ;  $\rho_{S2}$ ;  $\rho_{S1}$ ;  $\rho_{S<1}$  - Schüttdichte der Siebfraktion 3,15 mm; 2 mm; 1 mm und <1 mm(Rest)

**Tabelle A1.3:** Ergebnisse der Siebanalyse von NEBUFIGHT Granulat und PyroBubbles – Volumenanteile der Siebfractionen am Gesamtgemisch

Nr.	Gesamtmasse $m_{Ges}$ der Probe in g	Volumen $V_{Ges}$ der Probe in ml	Schüttdichte $\rho$ der Probe in g/l	Sieb 3,15 mm			Sieb 2 mm			Sieb 1 mm			Rest		
				$\rho_{S3,15}$ in g/ml	$V_{S3,15}$ in ml	$\frac{V_{S3,15}}{V_{Ges}}$ in %	$\rho_{S2}$ in g/ml	$V_{S2}$ in ml	$\frac{V_{S2}}{V_{Ges}}$ in %	$\rho_{S1}$ in g/ml	$V_{S1}$ in ml	$\frac{V_{S1}}{V_{Ges}}$ in %	$\rho_{S<1}$ in g/ml	$V_{S<1}$ in ml	$\frac{V_{S<1}}{V_{Ges}}$ in %
Pyro1	475,38	2041	0,238	0,205	162	7,9	0,23	790	38,7	0,237	1000	49	0,261	89	4,4
Pyro2	465,13	1982	0,235	0,215	175	8,8	0,229	820	41,4	0,241	915	46,2	0,27	72	3,6
Pyro3	470,67	1995	0,236	0,209	180	9	0,227	815	40,9	0,247	920	46,1	0,266	80	4
Pyro4	100	400	0,25	0,205	59	14,8	0,246	89	22,3	0,261	240	60,2	0,295	11	2,8
NEBU 1-2mm	529,96	1949	0,272	-	-	-	0,248	75	3,9	0,268	1700	87,2	0,321	174	8,9
NEBU 2-4mm	404,99	2011,5	0,201	0,198	370	18,4	0,198	1550	77	0,248	86	4,3	0,587	5,5	0,3

$\rho_{S3,15}$ ;  $\rho_{S2}$ ;  $\rho_{S1}$ ;  $\rho_{S<1}$  - Schüttdichte der Siebfraction 3,15 mm; 2 mm; 1 mm und <1 mm(Rest)

$V_{S3,15}$ ;  $V_{S2}$ ;  $V_{S1}$ ;  $V_{S<1}$  - Volumen der Siebfraction 3,15 mm; 2 mm; 1 mm und <1 mm(Rest)

$\frac{V_{S3,15}}{V_{Ges}}$ ;  $\frac{V_{S2}}{V_{Ges}}$ ;  $\frac{V_{S1}}{V_{Ges}}$ ;  $\frac{V_{S<1}}{V_{Ges}}$  - Volumenanteile der Siebfraction 3,15 mm; 2 mm; 1 mm und <1 mm(Rest)

04:02



Zündung

6:03



Heptanbrand nach 2 min

7:02



Heptanbrand nach 3 min

9:04



Beginn der  
Löschmittelzufuhr

9:33



Brand während der  
Löschmittelzuführung  
über 30 s Dauer

**Bild A1:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 004 (Teil 1)

10:04		Brand während der Löschmittelzuführung über 1 min Dauer
11:05		Brand nach ca. 2 min andauernder Löschmittelzuführung Intensivierung der Verbrennung durch Druckluftstrom
11:22		Löschmittel ist fast aufgebraucht, PyroBubbleschicht wird manuell mit einem Rechen gleichmäßig verteilt
11:58		Nach manuellem Aufschütten von ca. 10 l Löschmittel mittels Eimer
12:04		Nach zweiter Aufschüttung von ca. 10 l Löschmittel

**Bild A2:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 004 (Teil 2)

12:24		Manuelles Verteilen der Löschmittelschicht
12:43		Nach dritter Aufschüttung von ca. 10 l Löschmittel und nachfolgender manueller Verteilung
13:00		Nach vierter Aufschüttung von ca. 10 l Löschmittel und nachfolgender manueller Verteilung
13:17		Nach fünfter Aufschüttung von ca. 10 l Löschmittel und nachfolgender manueller Verteilung
13:50		vollständig gelöscht

**Bild A3:** Chronologie des Brand- und Löschversuchs 004 (Teil 3)